

№ 2⁺⁰
2018 [48]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



Институту инженерной физики



ЛЕТ



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- 7 Гордеев Г.А., Попов В.В., Пономарёва А.С., Павлов А.В., Смирнов Н.В.**
Расчет теплового режима элементов блока радиоэлектронной аппаратуры на этапе конструирования
- 12 Безродный Б.Ф., Безродный И.Ф., Виноградов А.С.**
Планирование процесса модернизации системы пожарной безопасности с учетом технических и экономических рисков
- 16 Пушкарёва Е.Ю., Золотухин В.А.**
Компенсация случайных возмущений в канале стабилизации угла тангажа баллистической ракеты на основе метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным
- 21 Нижегородов А.А., Евграфьев П.П.**
Методика построения структуры самокалибруемого акселерометрического модуля космического аппарата в условиях длительного полета
- 25 Авдеева М.М., Ананьев Е.М., Коровин О.В., Подвигин С.В.**
Метод оптимизации конструктивно-компоновочных и теплоэлектрических параметров термоэлектроволокна для защиты высоковольтных проводов воздушной линии электропередачи от обледенения
- 31 Редькин В.В., Шабалин О.В., Кулик М.В., Ермаков А.Д.**
Выбор принципиальной структурной схемы и основного оборудования бортового генератора холодного азота авторефрижератора

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- 35 Присяжнюк С.П., Присяжнюк А.С., Суховецкий Б.И.**
Антенные решетки с линейными размерами элементов больше длины волны
- 42 Цветков К.Ю., Квасов М.Н.**
Модель оперативной реконфигурации узла сети системы информационного обмена на основе немарковских систем обслуживания с «разогревом»

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 47 Семёнов П.А., Васильев А.Н., Кукин Н.С., Корчевая И.О., Мурадова А.Р.**
Определение ориентации осей NV-центров относительно поверхности монокристалла
- 50 Моргунов Д.А., Букин А.Г.**
Математическая модель многопоточной программы ЭВМ, построенная на основе переходов между функциями исходного кода
- 56 Коломбет В.А., Архипов В.Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю.**
Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов
- 63 Волков Г.Г., Кукин Н.С., Мурадова А.Р., Корчевая И.О., Мартынова И.А.**
SU(2) – кубит-куритовое управление NV-центрами в алмазе
- 72 Вагин А.И., Лобов И.В., Сытин А.Н., Коковин В.А., Кузнецов И.Е., Дягилев В.И.**
Программно-аппаратный комплекс для лабораторных научных исследований
- 76 Умников Е.В., Грачёв В.А., Атакищев О.И.**
Методы оценки эффективности интеллектуальных систем управления в применении к имитационному моделированию робототехнических комплексов
- 83 Быстров Д.Е., Лычагов А.С., Бикмаев Р.Р., Андреев А.Н.**
Методика оценки положения и ориентации системы технического зрения на локомотиве
- 86 Царёв А.П.**
Быстрые алгоритмы: наука, искусство, ремесло

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

- 95 Ананьев Е.М., Андрух О.Н., Ситников В.П.**
Обоснование требований к автономным источникам питания мобильных систем электрообогрева объектов

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

- 100 Бугаков И.А., Царьков А.Н.**
О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и психике роботов
- 106 СОБЫТИЯ**
- 107 AUTHORS**
- 109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**
- 110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ
Института инженерной физики**
№2 (48) 2018

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально
ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по группам научных специальностей:
05.11.00. Приборостроение, метрология и
информационно-измерительные приборы и системы
05.12.00. Радиотехника и связь
05.13.00. Информатика, вычислительная техника
и управление

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянкин

начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя
Центра оптико-нейронных технологий
НИИ системных исследований РАН,
доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник
Европейского центра ядерных исследований (CERN),
Adjunct Assistant Professor
Университета Миннесоты (США),
кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ
по образованию и науке,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур
и телекоммуникаций Западно-поморского
технологического университета (Польша),
доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет

заместитель директора Российского фонда
фундаментальных исследований по науке,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

Редакционная коллегия

Олег Николаевич Андрух

почетный работник науки и техники РФ,
кандидат технических наук, доцент

Борис Фёдорович Безродный

доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович

почетный геодезист РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Эрнестович Бородай

лауреат Государственной премии СССР,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Игорь Александрович Бугаков

заслуженный изобретатель РФ,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Вадим Геннадьевич Грибунин

почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук

Сергей Григорьевич Данилюк

доктор технических наук, профессор

Владимир Владимирович Зеленецкий

почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Казаков

член Союза писателей России
выпускающий редактор

Олег Павлович Кузнецов

кандидат технических наук, доцент

Александр Ильич Куприянов

доктор технических наук, профессор

Анатолий Викторович Мазин

доктор технических наук, доцент

Алексей Сергеевич Марков

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Митрофанов

заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор

Роман Леонидович Мусатов

кандидат технических наук
заместитель главного редактора

Игорь Николаевич Оков

доктор технических наук, профессор

Владимир Петрович Пашинцев

заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор

Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, доцент

Сергей Владимирович Смуров

почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Валерий Николаевич Умников

доктор технических наук, профессор

Владимир Анатольевич Цимбал

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Николаевич Шиманов

почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный радист РФ,
доктор технических наук, профессор



**Владимир Анатольевич
Шаманов**

Председатель Комитета
Государственной Думы по обороне
Герой Российской Федерации

генерал-полковник

Уважаемый Алексей Николаевич!

От лица депутатов Комитета Государственной Думы по обороне и себя лично поздравляю Вас, ветеранов и сотрудников Института с 25-летием со дня его основания.

В научно-технических и военных кругах Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» хорошо известно своими уникальными разработками, направленными на повышение обороноспособности нашей страны. Учёные Института добились серьёзных теоретических и практических результатов в области медико-биологических исследований, информационной безопасности, энергосберегающих технологий, конструкций баллистической защиты объектов вооружения, военной и специальной техники, конструкций тактических глушителей звука выстрела стрелкового оружия, светопрозрачных бронированных конструкций со специальными свойствами.

Высокую оценку руководства силовых структур получили разработанная и прошедшая государственные испытания не имеющая мировых аналогов инерциально-спутниковая навигационно-геоинформационная система с повышенной информационной надёжностью, автоматизированная информационно-аналитическая система «Портал оборонных технологий», экипировка с системой электрообогрева для военнослужащих и водолазов и эвакуационный термомешок.

Мне особенно приятно отметить, что научно-техническое и интеллектуальное ядро Института составляют учёные и специалисты – офицеры и генералы запаса: люди высокообразованные, работоспособные и ответственные.

Дорогие друзья, уважаемые коллеги! Примите самые искренние и тёплые поздравления с 25-летием со дня основания Института инженерной физики!

Желаю всем сотрудникам вашего сплочённого коллектива крепкого здоровья, профессиональных успехов и дальнейших научных побед во благо нашего Отечества – великой России!



**Михаил Алексеевич
Моисеев**

Генеральный инспектор
МО РФ,
Член центрального штаба
ОНФ,
Член Президиума
Общественной Палаты
Союзного государства,
Председатель Российского
Союза ветеранов

генерал армии

**Уважаемые коллеги, боевые друзья,
ветераны военной службы!**

Горячо и сердечно поздравляю вас со знаменательной датой – 25-летием со дня образования Института инженерной физики, который за годы своего существования превратился в ведущий научно-исследовательский центр Московской области.

С точки зрения мировой истории 25 лет – это всего лишь миг. Но если вести речь об организации, созданной и выжившей в период смены общественно-экономической формации, то такая мера времени выглядит значительным отрезком, почти эпохой. Особенно когда эпоха эта – переломная, включающая в себя взлеты одних и падение других, триумф сотен и беду миллионов.

В 90-х годах, объединившись небольшой группой ушедших в запас офицеров, вы поставили перед собой задачу выжить в тех условиях, драматических и для России, и для Вооруженных сил. И сегодня, пройдя через серьезные трудности, опираясь на высокий профессионализм, мощный научный потенциал и солидную экспериментально-производственную базу, вы вносите достойный вклад в решение актуальных научных и научно-технических проблем, направленных на повышение обороноспособности нашего государства.

Стоит отметить, что наряду с вашими достижениями в развитии науки и совершенствовании инновационного образования, ваш Институт одним из первых в Российской Федерации начал работу по формированию систем социальной адаптации и социальной защиты военнослужащих, граждан, уволенных с военной службы, и членов их семей. Благодаря вашей активной деятельности, сегодня тысячи жителей Московской области из числа этой категории граждан благодарны коллективу Института за оказанную поддержку и помощь в переломный момент жизни после увольнения из Вооруженных сил РФ.

Желаю сотрудникам Института успешного покорения новых вершин в военной науке, плодотворной работы, использования интеллектуального потенциала для возрождения и укрепления нашей великой России!

С юбилеем! Доброго здоровья вам и вашим близким!



**Юрий Иванович
Борисов**

заместитель Министра
обороны
Российской Федерации
действительный
государственный советник
Российской Федерации 1-го
класса

доктор технических наук

Дорогие друзья, уважаемые коллеги!

Внешнеполитическая ситуация последних лет, новые приоритеты в сфере национальной безопасности, особенности развития военно-политической обстановки в мире ставят перед Вооруженными силами Российской Федерации все новые задачи, решение которых носит комплексный и многоплановый характер.

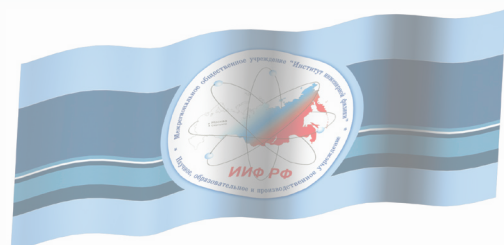
Приятно отметить, что совместная плодотворная деятельность Министерства обороны РФ и МОУ «Институт инженерной физики» позволила решить ряд прикладных технических вопросов с целью поддержания состояния боевой и мобилизационной готовности страны, стратегических ядерных сил, средств, обеспечивающих их функционирование и применение, а также систем управления, поддержания безопасных условий для жизни граждан России, защиты национальных интересов в территориальных водах, на континентальном шельфе, реализации масштабных проектов в условиях Крайнего Севера, для существенного повышения боевых возможностей армии и флота.

Коллектив Института за время сотрудничества с Министерством обороны РФ продемонстрировал высокий профессионализм и готовность к выполнению нестандартных, сложных задач, которые позволяют Вооруженным силам России оставаться современными, мобильными и боеспособными.

От всей души поздравляю дружный и сплоченный коллектив МОУ «ИИФ» с 25-летним юбилеем со дня основания Института. Это прекрасный возраст, позволяющий собрать и проанализировать накопленный опыт, и уверенно идти вперед к достижению новых целей.

Желаю Институту продолжать держать курс на инновационное развитие, с каждым годом усиливать команду профессионалов, способную творчески и креативно решать задачи, которые ставит перед нами жизнь!

Стабильности вам, успехов и процветания!





**Сергей Викторович
Каракаев**

Командующий Ракетными
войсками
стратегического назначения

генерал-полковник
кандидат военных наук

От имени Военного совета Ракетных войск стратегического назначения и от себя лично поздравляю руководство и весь коллектив Института инженерной физики с 25-летием создания Межрегионального общественного учреждения!

С гордостью хочу отметить, что руководящий состав и идейный центр Института сформировался из офицерского состава Серпуховского высшего военного командно-инженерного училища ракетных войск. Офицеры-ракетчики в тяжелые для нашей страны 90-е годы, в период сокращения Вооруженных сил, нашла в себе силы и решимость не бросить любимое дело – научно-исследовательскую, конструкторскую работу, а создать организацию для продолжения своей деятельности на гражданском поприще в интересах обороноспособности страны.

Военная закалка, дух воинского братства, серьезная научная и практическая подготовка, полученные за годы учебы и службы, позволили офицерам-ракетчикам создать Институт, который работает на благо оборонно-промышленного комплекса и других отраслей экономики нашей страны. Залог успешного развития – постоянное совершенствование и расширение производственной и материально-технической базы, дисциплина и системный подход в решении задач. Институт регулярно и на очень высоком уровне выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на укрепление боевой мощи РВСН.

В этот знаменательный день юбилея желаю коллективу Института идти только вперед в научной, производственной деятельности. Очень важно, что Институт занимается образованием молодежи, привлекает новое поколение к научной, изобретательской деятельности, совместно с Военной академией РВСН имени Петра Великого (филиалом в г. Серпухове) готовит кадры для ракетных войск. В этом еще одна важная заслуга перед государством, перед российской наукой. Впереди большие перспективы и новые свершения! Успехов, здоровья, мира и процветания!



**Владимир Иванович
Королёв**

Главнокомандующий
Военно-Морским Флотом РФ

адмирал

Поздравляю Институт инженерной физики с 25-летним юбилеем от себя лично и от имени Военного Совета Военно-Морского Флота!

Высокие цели, смелые научные подходы к решению задач и весомость результатов позволили Институту заслужить неоспоримый авторитет и занять достойное место в ряду передовых инновационных предприятий России!

Благодаря целеустремленности, огромной созидательной энергии, творческому поиску, высокому профессионализму, умению бережно хранить традиции коллектив Института неизменно добивается успехов в инновационной, научно-технической, образовательной деятельности. За четверть века своего существования он внес уникальный вклад в разработку и внедрение новейших образцов оборудования, высокоточных приборов, информационных технологий и военной экипировки, в том числе для Военно-Морского Флота России.

Институт взял шефство над малым ракетным кораблем «Серпухов», оказывает существенную помощь экипажу корабля. Специалисты управления навигационно-геодезических систем провели на корабле «Серпухов» и «Зеленый дол» работы по эталонированию, определению истинного курса кораблей на этапе заводских ходовых и государственных испытаний. Профессионализм специалистов и высокая точность уникальных приборов, разработанных Институтом, позволяет регулярно и квалифицированно проводить такие работы на кораблях ВМФ. Большим подспорьем в работе водолазов Военно-Морского Флота стали разработанные учеными Института уникальные водолазные костюмы с системой локального обогрева.

Пусть и впредь профессиональный поиск, авторские находки, преданность делу будут главными в деятельности Института инженерной физики! От всей души желаю коллективу дальнейшей реализации научного и творческого потенциала, новых интересных идей, профессиональных достижений, воплощения в жизнь всех задуманных планов и проектов, здоровья, благополучия, счастья и уверенности в завтрашнем дне!



Александр Петрович Чуприян

Заместитель Министра Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

генерал-полковник
внутренней службы

Важнейшей задачей Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий на сегодняшний день является внедрение отечественных разработок в области обеспечения безопасности, предупреждения и ликвидации последствий техногенных катастроф, борьбы с криминалом и террористическими угрозами. От качества выстроенной системы безопасности зависит развитие экономики нашей страны, поэтому технологии защиты населения должны развиваться с опережением на несколько шагов вперед. В связи с этим особенно важно, что в нашей стране существуют такие организации как Институт инженерной физики, которые могут практически реализовать инновационную идею в готовое изделие, проведя все этапы от разработки до внедрения.

За 25 лет плодотворной работы Институт стал стабильным авторитетным предприятием с весомым научным и техническим потенциалом, собственной лабораторной, производственной и испытательной базой. Коллектив Института – профессионалы, выдающиеся ученые, инженеры, конструкторы, преданные своему делу, ежедневно самоотверженно исполняющие свой долг перед Родиной.

Изобретения ученых Института известны на государственном уровне, уникальны и не имеют мировых аналогов. В частности, это комплекс технических средств охраны объектов и территорий «Ловец», охранные извещатели серии «TRAVERS», автономная системы пожаротушения на основе микрокапсулированных газов, костюмы бойца спецназа и водолаза, оснащенные системой локального обогрева, эвакуационный термомешок, который позволяет предотвращать переохлаждение пострадавших при эвакуации. Водолазные костюмы, позволяющие продлить работу водолазов под водой на 30-40% без риска переохлаждения организма, успешно прошли испытания водолазами центра «Лидер» МЧС России при проведении поисково-спасательной операции после крушения самолета Ту-154 в Сочи. Планируется, что такие водолазные костюмы с нагревательными элементами поступят на оснащение МЧС России в ближайшее время.

От всей души поздравляю Институт с 25-летием! Желаю приумножения и сохранения славных традиций, новых достижений на благо развития науки, образования, обороноспособности России!



Александр Леонидович Манилов

Заместитель Председателя Совета командующих Пограничными войсками – Председатель Координационной службы

генерал-полковник

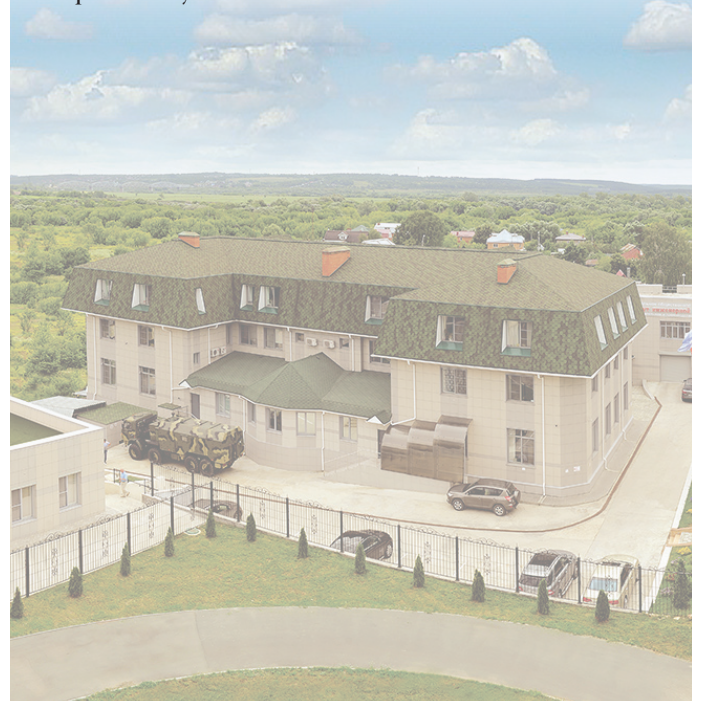
От имени руководства, всех сотрудников Координационной службы Совета командующих Пограничными войсками поздравляю коллектив Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» с 25-летием со дня образования!

За период своего существования в Институте созданы мощный научный потенциал и экспериментально-производственная база, позволяющие обеспечивать эффективную научно-исследовательскую деятельность и развитие научно-технического сотрудничества со многими российскими организациями и предприятиями.

Участвуя в различных международных выставках по безопасности вы снискали авторитет и уважение не только среди предприятий оборонно-промышленного комплекса, но и широкого круга государственных учреждений и ведомств Российской Федерации и государств-участников Содружества Независимых Государств.

Убежден, что наработанный вами опыт будет и в дальнейшем способствовать укреплению обороноспособности нашего государства.

Желаю коллективу Института плодотворной работы в решении стоящих перед ним ответственных задач, крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и творческих успехов.





Ювеналий

Митрополит
Крутицкий и Коломенский
Управляющий
Московской епархией

**Уважаемый Алексей Николаевич!
Дорогие братья и сестры!**

Примите сердечное поздравление с юбилеем Института инженерной физики, который прославился многими значимыми достижениями на ниве отечественной науки.

Мне радостно, что между Вашим институтом и Московской епархией сложились отношения доброго сотрудничества. Они свидетельствуют о том, что существовавшее в прошлом столетии искусственно созданное средостение между верой и знанием успешно преодолено.

Украшением Вашего института является часовня в честь преподобного Алексия, человека Божия. Там у каждого жаждущего помощи Божией и сердечного утешения есть возможность помолиться, предаться духовному уединению для размышления о делах своей жизни. Как сказано у пророка, «остановитесь на путях ваших и рассмотрите... где путь добрый, и идите по нему» (Иер. 6:16).

Всем сотрудникам Института инженерной физики желаю крепкого здоровья и новых научных открытий во славу нашего Отечества и на благо российского народа. Пусть Всемилостивый Господь благословит ваши труды!

**Божие благословение
да пребывает со всеми вами!**



Денис Петрович Буцаев

Заместитель Председателя
Правительства Московской
области –
министр инвестиций и
инноваций
Московской области

Уважаемый Алексей Николаевич!

Поздравляю Вас и весь коллектив Института инженерной физики со знаменательной датой – 25-летием со дня создания.

Институт является признанным лидером в оказании услуг в области IP-телефонии, интернета и цифровых систем.

Успехи в экономике и социальной сфере напрямую зависят от научного прогресса, динамичного внедрения современных технологий. Приятно, что за годы работы в Институте сложился коллектив профессионалов, работа которых позволяет проекту пройти сложный путь от идеи до готового изделия с последующим внедрением в оборонную промышленность и другие отрасли экономики.

Выражаю искреннюю признательность и благодарность всему коллективу Института инженерной физики за нелегкий труд на благо отечественной науки и от всей души желаю здоровья, благополучия, новых творческих успехов и реализации всего задуманного.





**Дмитрий Вячеславович
Жарков**

Глава городского округа
Серпухов

**Уважаемый Алексей Николаевич!
Дорогие сотрудники Межрегионального
общественного учреждения
«Институт инженерной физики»!**

**Поздравляю с 25-летием со дня
образования Института!**

Институт инженерной физики – один из ведущих образовательных и научно-методических центров Серпухова и всего Подмосковья.

Высококвалифицированный профессорско-преподавательский состав обеспечивает эффективный вклад в интеграцию науки и образования, осуществляет фундаментально-поисковые, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, а также внедрение передовых достижений науки и техники в производство, реализацию социально-значимых проектов и программ, развитие новейших технологий обучения и организацию учебного процесса.

Широкая практическая, инновационная направленность, новаторские проекты, которые реализует Институт, позволяют уверенно идти в ногу со временем, заниматься исследовательской работой. Ее результаты нашли воплощение в государственных, оборонных и коммерческих контрактах в интересах различных министерств и ведомств, включая и Минобороны России.

Благодаря целеустремленности, огромной созидательной энергии, творческому поиску, высокому профессионализму, умению бережно хранить заложенные традиции ваш коллектив неизменно добивается успехов в осуществлении самых смелых планов и идей. И сегодня современные разработки ваших учёных не имеют мировых аналогов!

**От всей души желаю Вам и коллективу
неиссякаемого энтузиазма, вдохновения,
благополучия и дальнейшего процветания!**



**Алексей Николаевич
Царков**

Президент Института –
Председатель Правления
Института
заслуженный деятель
науки РФ
доктор технических наук,
профессор
Почетный гражданин города
Серпухова

Дорогие друзья! Уважаемые коллеги!

Сегодня мы празднуем 25-летие Института инженерной физики – наш первый крупный юбилей! Даже не верится, что прошло четверть века!.. Даже не верится, что начинали мы группой единомышленников из нескольких человек в съемной однокомнатной квартире, а сегодня научно-производственно-педагогический потенциал МОУ «ИИФ» составляют 810 сотрудников, в числе которых 36 заслуженных деятелей науки и почетных работников, 25 докторов наук, 99 кандидатов наук, 23 профессора и 88 доцентов. А материально-техническая база Института состоит из административного, научно-исследовательского, учебно-производственного, испытательно-производственного и экспериментального корпусов общей площадью более 10000 квадратных метров.

За эти годы наш Институт стал авторитетным предприятием оборонно-промышленного комплекса России. Мы выполняем научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на укрепление обороноспособности страны. Многие инновационные разработки наших ученых высоко оценены на федеральном уровне, получили высокую оценку руководства силовых структур. Мы добились серьезных теоретических и практических результатов в области информационной безопасности, медико-биологических исследований, конструкций баллистической защиты объектов вооружения, военной и специальной техники, энергосберегающих технологий. А разработанная и прошедшая государственные испытания инерционно-спутниковая навигационно-геоинформационная система с повышенной информационной надежностью вообще не имеет мировых аналогов. Мы гордимся результатами своих работ по совершенствованию конструкций тактических глушителей звука выстрела стрелкового оружия, светопрозрачных бронированных конструкций со специальными свойствами, по экипировке с системой электрообогрева для военнослужащих и водолазов и многими другими востребованными временем разработками.

Наши успехи и достижения – результат огромного труда всего нашего дружного коллектива! Огромное спасибо каждому за профессионализм и ответственное отношение к общему делу!

Выражаю искреннюю признательность и благодарность всем коллегам и партнерам, которые работали с нами эти годы, и надеюсь на дальнейшее плодотворное сотрудничество!

**С юбилеем, дорогие друзья! Здоровья,
счастья, благополучия и процветания
вам, вашим родным и близким!**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕМЕНТОВ БЛОКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ЭТАПЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ

CALCULATION OF THE THERMAL CONDITIONS OF THE ELEMENTS OF THE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT BLOCK AT THE DESIGN STAGE

Василий Викторович Попов

начальник отдела

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а

Тел.: 8 (4967) 35-31-93

E-mail: sng@iifmail.ru

Геннадий Алексеевич Гордеев

начальник управления

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: 8 (4967) 35-31-93

E-mail: sng@iifmail.ru

Андрей Владимирович Павлов

научный сотрудник

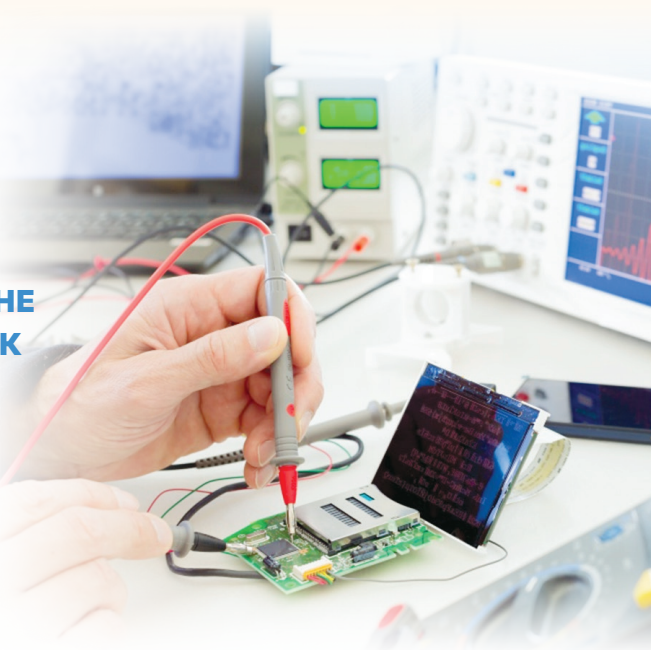
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а

Тел.: 8 (4967) 35-31-93

E-mail: sng@iifmail.ru



Алина Сергеевна Пономарёва

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а

Тел.: 8 (4967) 35-31-93

E-mail: sng@iifmail.ru

Николай Владимирович Смирнов

научный сотрудник

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а

Тел.: 8 (4967) 35-31-93

E-mail: sng@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассматривается математическое моделирование процесса теплопереноса внутри герметичного блока, содержащего элементы радиоэлектронной аппаратуры. Задается предельное тепловыделение основных электронных компонентов внутри блока. Рассчитывается температура внутри электронного блока при наличии и отсутствии заливки его теплопроводящим компаундом. Показано, что при отсутствии заливки в герметичном блоке возникает перегрев электронных компонентов. Оптимальный тепловой режим достигается при заливке теплопроводящим компаундом рассматриваемого электронного блока.

Ключевые слова: печатная плата, модуль питания, радиоэлектронная аппаратура, тепловая мощность электронных компонентов, распределение температур внутри электронного блока, стационарный тепловой расчет.

Summary

The mathematical modeling of the heat transfer process inside closed box design with electronic components is considered in this article. The heat rating of main electronic components located in the box is given. The temperature inside the electronic unit is calculated in the presence and absence of components filling by heat-conducting compound. It is shown that in the absence of compound filling overheating of electronic components arises in the closed box. The optimum thermal mode is reached when the considered electronic block is filled by a heat-conducting compound.

Keywords: Printed Circuit Board (PCB), power supply, electronic equipment, heat rating of electronic component, temperature profile on electronic module, stationary thermal computation.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

При проектировании блоков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) возникает потребность в оценке теплового режима работы. Конструктору необходимо проанализировать зависимости между габаритами блока, перечнем электронных компонентов, их электрическими характеристиками и условиями эксплуатации [1].

Одним из требований к электронным изделиям является компактная конструкция корпуса. При этом перегрев электронных компонентов снижает надежность системы и может привести к потере ее работоспособности. Без проведения теплового расчета с имитацией реальных условий эксплуатации невозможно обосновать конструкцию проектируемого электронного блока. В процессе разработки изделия для каждого предполагаемого размещения элементов внутри блока необходимо проводить свой расчет температурного поля [2].

На рисунке 1 представлена 3D модель проектируемого блока РЭА, содержащего две печатные платы с микроэлементами и два модуля питания. Каждый модуль питания и каждая плата расположены в отдельном отсеке внутри герметичного корпуса. Внутренние и внешние стенки корпуса сделаны из алюминиевого сплава, обладающего хорошей теплопроводностью.

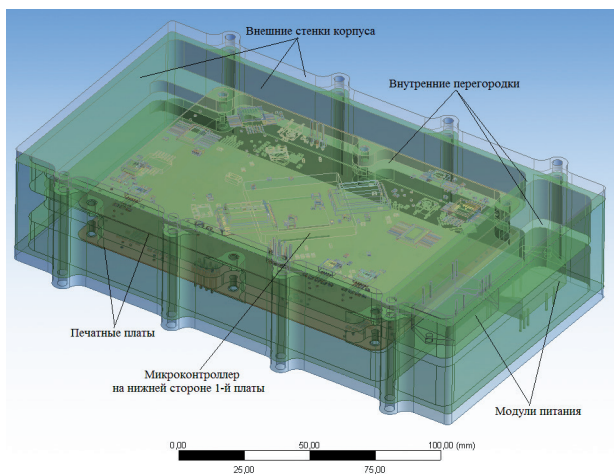


Рис. 1. Вид проектируемого корпуса РЭА с прозрачными стенками

На печатных платах расположены различные электронные компоненты, выделяющие при работе тепловую энергию. Потребляемая радиодетальными электрическая энергия преобразуется в них в электромагнитную, механическую, тепловую и другие виды энергии. Таким образом, часть потребляемой радиодетальными энергии превращается в полезные сигналы, остальная – в теплоту. Известно, что в полупроводниковых

элементах только 5%-10% потребляемой энергии превращается в полезную энергию, остальная идет в теплоту [1].

В рассматриваемом устройстве основное тепловыделение на плате производится микроконтроллерами, расположенными на нижней стороне каждой печатной платы и касающимися своей свободной поверхностью горизонтальной внутренней стенки, через которую происходит отвод тепла на корпус.

Примененные в конструкции импульсные преобразователи напряжения (модули питания) имеют высокий КПД и характеризуются низким тепловыделением в режиме нагрузки.

При работе модулей питания оценивается мощность тепловых потерь P_n по формуле:

$$P_n = P_{\text{вых}}(1/\eta - 1), \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – мощность, потребляемая нагрузкой; η – КПД [3].

В проектируемом электронном блоке модули питания прикреплены к горизонтальной перегородке сверху и снизу так, что каждый прибор находится в отдельном отсеке. Тепло распространяется от модулей питания через перегородку на внешние стенки корпуса.

При конструировании электронного блока необходимо знать распределение температуры внутри корпуса, на модулях питания и микроконтроллерах. Задача рассматривается в двух вариантах:

1. Теплообмен внутри герметичного корпуса происходит путем свободной конвекции воздуха при нормальном атмосферном давлении.

2. Внутренность корпуса залита теплопроводящим компаундом.

Математическое моделирование процесса теплопередачи проводится при помощи программного модуля *Ansys Icepak* в составе бесплатного программного комплекса *Ansys Student*. *Ansys Icepak* – это современное специализированное программное средство для моделирования корпусов электронных систем и процессов теплопередачи внутри них [4]. Данный модуль позволяет специалистам протестировать конструкцию корпуса, рассчитать воздушные потоки внутри него, осуществить термический контроль электроники. В *Ansys Icepak* используются обширные библиотеки стандартных электронных компонентов, обычно входящих в проектируемый блок: печатные платы, источники тепловой мощности, радиаторы, вентиляторы, внутренние перегородки, внешние стенки и прочее. Стандартные электронные компоненты представляются в виде геометрических конструкций и связанных с ними материалов, обыч-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

но используемых в электронной технике. Имеется также отдельная библиотека стандартных материалов [5].

Для теплового расчета рассмотренная на *рисунке 1* модель электронного блока представляется в Ansys Icepak следующим образом. Корпус заменяется параллелепипедом с алюминиевыми внутренними перегородками и внешними стенками, соответствующими реальной геометрии проектируемого блока. Внутри коробки моделируются платы, в центре которых на сторонах, обращенных к горизонтальной перегородке, прикрепляются источники тепловой мощности (микроконтроллеры). Каждый микроконтроллер своей свободной стороной касается алюминиевой горизонтальной перегородки для передачи тепла на корпус. Модули питания моделируются объемными источниками тепловой энергии. Из опыта проектирования подобных электронных блоков известно, что можно рассматривать тепловыделение остальных расположенных на платах электронных компонентов в сумме, не выделяя отдельные элементы. Преобразованная в геометрические примитивы Ansys Icepak 3D модель электронного блока представлена на *рисунке 2*.

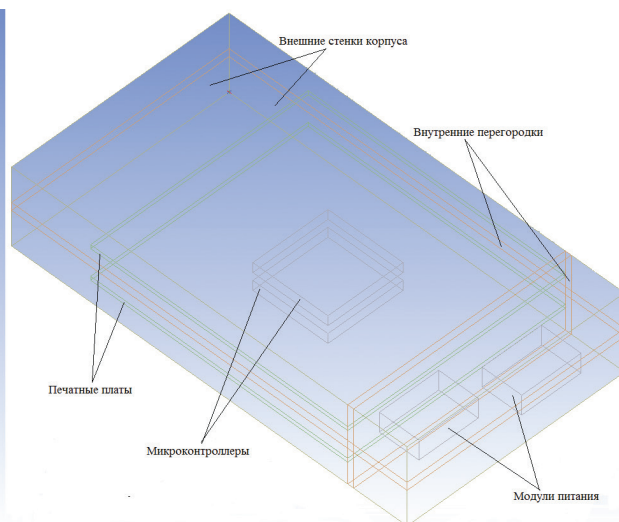
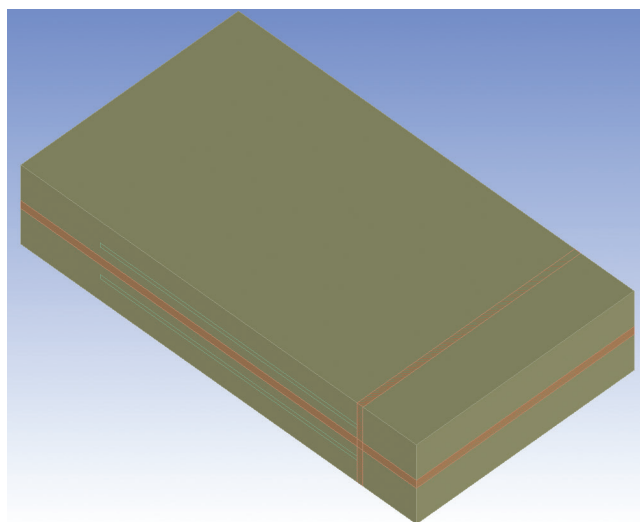


Рис. 2. Вид геометрической модели в IcePak: слева – твердотельное представление модели; справа – каркасное представление

Исходные данные для проведения стационарного теплового расчета следующие.

Из технических условий на использованные в блоке микроконтроллеры получено, что предельная электрическая мощность при их работе равна 1,2 Вт. Практически вся использованная микроконтроллерами электрическая энергия переходит в тепловую. Отсюда предполагаем, что рассеиваемая микроконтроллерами тепловая мощность будет не более 1,2 Вт.

Из опыта проектирования аналогичных конструкций задается суммарное тепловыделение на каждой печатной плате, также равное 1,2 Вт.

Таким образом, получено, что модуль питания должен обеспечивать на плате полезную электрическую нагрузку мощностью 2,4 Вт. Учитывая значение КПД $\eta=0,75$ [3], по формуле (1) рассчитывается мощность тепловых потерь $P_n=1,0 \text{ Вт}$, которая и используется в качестве исходных данных.

Граничными условиями в тепловом расчете является конвективный теплообмен с внешних стенок корпуса с коэффициентом теплоотдачи 5,6 Вт/(К•м²) [6] и температурой окружающей среды 60°C.

Окончательное распределение температуры в электронном блоке при стационарном тепловом расчете существенно зависит от значения коэффициента теплоотдачи в граничном условии на внешних стенках алюминиевого корпуса. При улучшении вентиляции внешней поверхности блока отток тепла со стенок увеличивается, поэтому происходит снижение температуры корпуса в целом. В общем случае, коэффициент конвективной теплоотдачи подбирается

экспериментально, его значение обычно находится в диапазоне от 5,6 Вт/(К•м²) [6] до 16 Вт/(К•м²) [3]. В данной работе выбрано наименьшее значение коэффициента теплоотдачи, что предполагает минимальное движение окружающего воздуха.

В качестве материала печатных плат задается стеклотекстолит с теплопроводностью, зависящей от процента металлизации поверхности; материалом микроконтроллеров и модулей питания задается керамика; внутренних и внеш-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

них стенок корпуса – алюминий. Свойства использованных материалов представлены в *таблице 1*.

Таблица 1

Название материала	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплопроводность, Дж/(кг·К)
Алюминий	2800	205	900
Стеклотекстолит	1250	0,35	1300
Керамика	3970	15	910
Компаунд (эпоксидная смола)	1800	0,63	1004

Вариант 1. Теплопередача внутри герметичного блока осуществляется при помощи свободной конвекции воздуха. Моделируется ламинарное стационарное течение воздуха в приближении Буссинеска. В результате рассчитываются скорость, давление воздушных потоков, температура воздуха и внутренних объектов. Приток и отток воздуха внутри герметичного блока не происходит, поэтому скорость воздушных масс при конвективном теплопереносе является незначительной. Интерес представляет только распределение температуры внутри блока. На *рисунке 3* показано температурное поле на плоскости, проходящей через центральное горизонтальное сечение алюминиевого корпуса.

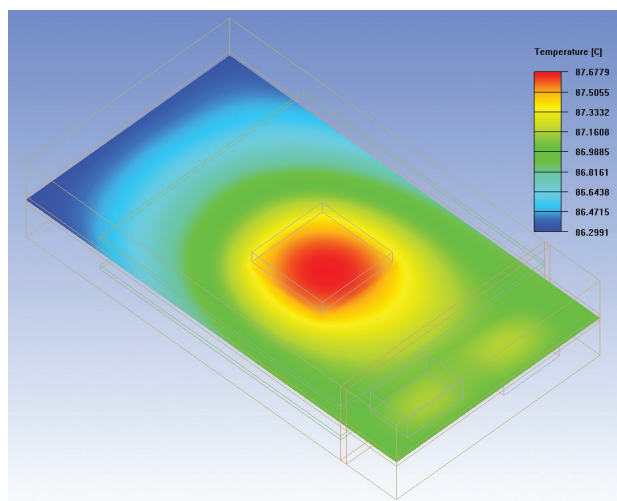


Рис. 3. Распределение температуры на центральной горизонтальной плоскости внутри герметичного корпуса с воздухом внутри

На *рисунке 4* представлено распределение температуры на нескольких вертикальных сечениях внутри герметичного корпуса, проходящих через модули питания, микроконтроллеры, а также внутренние части корпуса и все боковые панели блока.

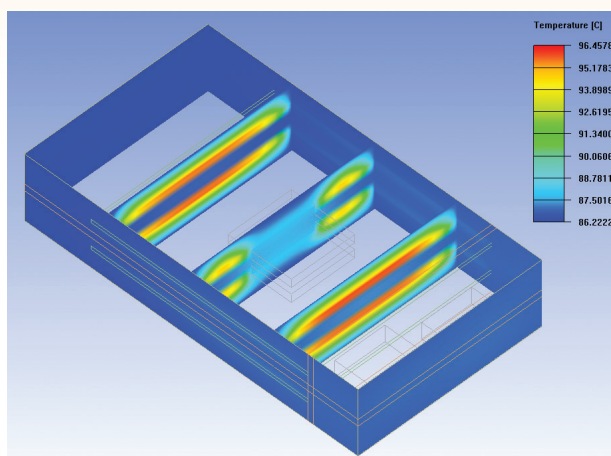


Рис. 4. Распределение температуры на нескольких вертикальных сечениях внутри герметичного корпуса

Как следует из *рисунков 3, 4*, максимальная температура, превышающая 96°C, будет наблюдаться в непосредственной близости от поверхностей печатных плат. Внешние стенки корпуса нагреваются свыше 86°C. Температура на микроконтроллерах будет превышать 87°C. Еще раз подчеркнем, что реальное распределение температуры зависит от коэффициента теплоотдачи корпуса в окружающую среду. Кроме того, в действительности все электронные компоненты работают в импульсном режиме: период функционирования блока сменяется периодом ожидания применения. Однако при математическом моделировании используется самый плохой вариант – постоянное тепловыделение. Рассчитанная в данном варианте температура блока является слишком высокой для нормальной работы электронных компонентов, поэтому внутренность герметичного корпуса с платами и модулями питания заливается теплопроводящим компаундом.

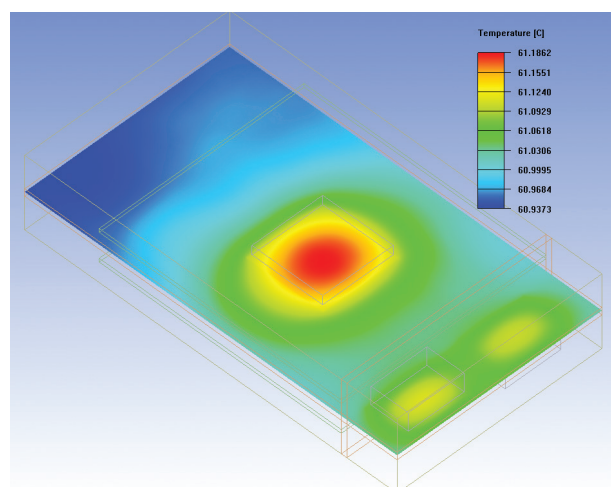


Рис. 5. Распределение температуры в центральном горизонтальном сечении герметичного корпуса с компаундом внутри

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Вариант 2. На *рисунке 5* представлено распределение температуры в горизонтальном сечении алюминиевого корпуса при заливке его внутренних отсеков компаундом. Коэффициент теплоотдачи от корпуса в окружающий воздух выбран таким же, как и в варианте 1.

Как показано на *рисунке 5*, максимальная температура блока в горизонтальном центральном сечении будет ниже 62°C. На *рисунке 6* представлено распределение температуры в нескольких вертикальных сечениях и на внешних сторонах корпуса. Из анализа *рисунков 5, 6* следует, что температура внутри и снаружи блока не превысит 62°C.

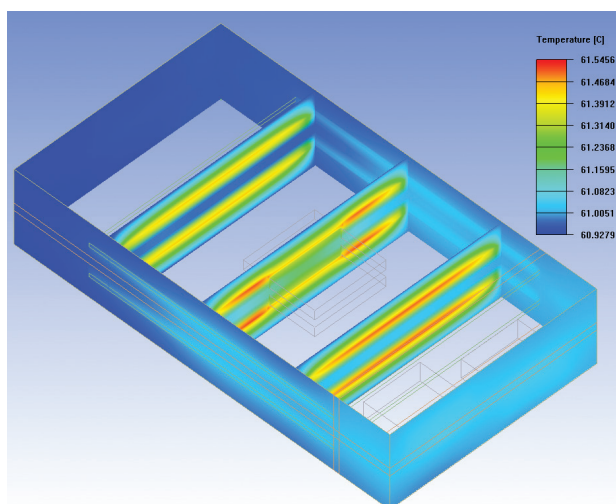


Рис. 6. Распределение температуры на нескольких вертикальных сечениях внутри герметичного корпуса в случае заливки компаундом

Отчет о температуре на геометрических объектах модели можно получить непосредственно в программе *Ansys IcePak*. Данные из отчета представлены в *таблице 2*.

Таблица 2

Название объекта	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Средняя температура, °C
Модуль питания	61,1	61,5	61,3
Печатная плата	61,0	61,5	61,4
Микро-контроллер	61,1	61,4	61,2
Внешняя стенка корпуса	60,95	61,03	61,0

Из результатов проведенных расчетов следует, что при заливке компаундом внутренности герметичного корпуса для электронных компонентов устанавливается допустимый тепловой режим. Из технических условий было получено, что нормальный режим работы микроэлементов осуществляется при температуре до 85°C. Таким образом, перегрев модулей питания и микро-

контроллеров при рассмотренной конструкции герметичного блока в случае заливки его теплопроводящим компаундом не наступит даже при наименьшем коэффициенте теплоотдачи от стенок в окружающую среду и постоянном тепловыделении от всех электронных элементов.

Следовательно, применение современных программных средств для математического моделирования электронной аппаратуры позволяет на этапе конструирования спрогнозировать тепловой режим используемых электронных компонентов и исключить возможность их перегрева при эксплуатации.

Литература

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов. М: Высшая школа, 1984. 247 с.
2. Букин А.Г., Смирнов Н.В., Пономарёва А.С., Гордеев Г.А., Попов В.В. Вычислительное моделирование тепловыделения модуля электронного устройства при проведении контрольных испытаний аппаратуры // Известия Института инженерной физики, 2017. № 3 (45). С. 33-36.
3. Модули питания серии МДМ, МДМ-П, МДМ-ЕП, МДМ-М, МДМ-МП. Руководящие технические материалы.
4. Электронный ресурс www.cae-expert.ru. Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ.
5. Ansys Icepak User's Guide. Описание Ansys Icepak на сайте производителя.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. М: Мир, 1980. 520 с.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 81.92

ПЛАНИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ

PLANNING OF THE INNOVATION PROCESS MODERNIZATION OF FIRE SAFETY SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNICAL AND ECONOMIC RISKS

Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор
заместитель руководителя
Центр кибербезопасности АО «НИИАС»
заведующий кафедрой
«Прикладная математика»
Московский автомобильно-
дорожный государственный
технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Москва,
Ленинградский проспект, д. 64
Тел. +7 (903) 774-28-26
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

Игорь Фёдорович Безродный
кандидат технических наук, доцент
научный консультант
АО «Научно-производственное
предприятие «ГЕРДА»
Адрес: 125480, Москва, ул. В.Лациса, д.17, стр. 1
Тел.: +7 (495) 755-88-45

Алексей Сергеевич Виноградов
научный сотрудник МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Аннотация

Предложен вероятностно-игровой подход к планированию инновационного процесса модернизации системы пожарной безопасности (ПБ) объекта или подразделения, на основе оценок вероятности полного обеспечения пожарной безопасности без затрат на установки пожаротушения, учитывающих возможность внедрения различных инноваций и преодоления определяемых их реализацией различных рисков.

Ключевые слова: система пожарной безопасности (ПБ), риск возникновения пожара, установка пожаротушения, функциональный цикл, полное обеспечение ПБ, инновации, статистика пожаров.

Summary

We propose a probabilistic-game approach to planning in the innovation process of modernization of the system of fire safety (FS) an object or unit on the basis of estimates of the likelihood of full provision FS security without the cost of fire extinguishing systems, taking into account the possibility of implementation of various innovations and overcome defined by their implementation of different risks.

Keywords: the system of fire safety (FS), risk of the fire, fire extinguishing systems, the functional cycle, the full support of FS, innovations, statistics of fires.

В настоящее время существует большое количество различных методик оценки частных критериев эффективности, в том числе вероятностных, процесса внедрения инноваций при модернизации различных функциональных систем. Однако единый подход в данном вопросе отсутствует. Среди всех инноваций будем рас-

сматривать инновации, направленные на повышение качества функционирования той или иной системы на примере системы полного, т.е. стопроцентного, обеспечения пожарной безопасности объекта.

Тогда в качестве критерия их эффективности целесообразно определить вероятность полно-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

го обеспечения пожарной безопасности. Не секрет, что для зданий и сооружений различной ведомственной принадлежности и различных форм собственности одной из существенных затрат являются расходы на стационарные установки пожаротушения. Вопрос о необходимости оборудования установками пожаротушения и их эффективности находится за пределами нашего исследования. Поэтому возникает необходимость разработки модели указанного процесса, позволяющей оценивать вероятность полного обеспечения пожарной безопасности и учитывая на каждом этапе функционального цикла объекта или подразделения, как использование различных вариантов внедрения инноваций, так и влияние определяемых их реализацией различных рисков.

При этом вероятность полного обеспечения пожарной безопасности (ПБ) целесообразно рассчитывать путем перемножения вероятностей P_1, \dots, P_n полного обеспечения ПБ для отдельных этапов функционального цикла. Поскольку эти этапы выполняются последовательно, то соответственно могут считаться статистически независимыми событиями. При таком подходе к построению математической модели процесса обеспечения пожарной безопасности весь цикл функционирования (функциональный цикл) следует разбить на этапы (операции), которые представляют собой также статистически независимые события и выбрать их рациональное количество, чтобы модель, с одной стороны, адекватно отражала реальный ход событий, а с другой стороны не представляла трудностей с точки зрения применения соответствующего математического аппарата.

Предполагается, что для каждого этапа функционального цикла, то есть процесса функционирования объекта или подразделения определены наиболее существенные для рассмотрения инновационные элементы и операции. Это позволяет полностью определить возможные варианты изменения ситуаций после внедрения инноваций и, соответственно, далее речь может идти об определении своего рода инновационных проектов, подразумевающих применение конкретных инноваций для того или иного этапа функционального цикла. При условии, что учтены наиболее существенные инновационные элементы и операции эти инновационные проекты для каждого этапа функционального цикла следует формировать так, чтобы они составляли полную группу событий. Учитывая выбранный вероятностный подход к оценке эффективности инновационного процесса модернизации системы обеспечения пожарной безопасности

функционального цикла, вероятность полного обеспечения ПБ по окончании рассматриваемого этапа функционального цикла с использованием при этом одного из соответствующих данному этапу функционального цикла инновационных проектов может быть рассчитана при помощи формулы полной вероятности. При этом условные вероятности полного обеспечения ПБ при условии внедрения конкретного инновационного проекта можно вычислять, применяя метод экспертного оценивания.

Сущность экспертного оценивания заключается в рациональной организации проведения высококвалифицированными специалистами анализа проблемы с количественным оцениванием суждений и обработкой их результатов. При этом можно выделить следующие основные этапы экспертного оценивания:

- подбор экспертов и организация опроса;
- выбор шкалы измерений;
- выбор метода обработки оценок отдельных экспертов;
- проверка согласованности оценок;
- обработка экспертных оценок.

Также расчет указанных условных вероятностей может осуществляться на основании статистических данных, в частности о результатах внедрения аналогичных инвестиционных проектов на аналогичных объектах или на объектах, имеющих сходные функции и условия функционирования, например климатические условия.

Таким образом, можно приступить к непосредственному построению вероятностной модели планирования инновационного процесса модернизации системы обеспечения ПБ функционального цикла объекта или подразделения.

Пусть в общем случае рассматриваемый функциональный цикл состоит из n статистически независимых этапов, вероятность полного обеспечения ПБ по окончании которых (события A_i) обозначим $P_i = P(A_i)$ ($i=1, \dots, n$). Тогда вероятность полного обеспечения ПБ в конце всего функционального цикла равна

$$P = \prod_{i=1}^n P_i = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (1)$$

Теперь предположим, что на i -ом этапе могут использоваться k_i различных инновационных проектов модернизации системы обеспечения пожарной безопасности функционального цикла. События, описывающие использование упомянутых инновационных проектов, как было указано выше, образуют полную группу взаимонепересекающихся событий, поскольку использование одного из инновационных проектов естественно исключает использование другого, и какой-либо из проектов будет реализован обя-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

зательно. При таком подходе, самым тривиальным будет случай, когда инновационный проект будет пустым, то есть система обеспечения пожарной безопасности на конкретном этапе функционального цикла просто не будет модернизироваться. В результате можно записать вероятность полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа по формуле полной вероятности:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^{k_j} P(A_i | B_j) P(B_j) = \sum_{j=1}^{k_j} r_{ij} q_j, \quad (2)$$

где $r_{ij} = P(A_i | B_j)$ – условная вероятность полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа при условии выбора для модернизации системы обеспечения пожарной безопасности j -го инновационного проекта;

$q_j = P(B_j)$ – безусловная вероятность выбора из возможных вариантов j -го инновационного проекта для модернизации системы обеспечения пожарной безопасности i -го этапа функционального цикла, то есть частота, с которой этот проект может выбираться.

Отметим, что множества инновационных элементов и операций могут как не пересекаться для различных этапов функционального цикла, так и совпадать. Среди этих двух крайних по сути вариантов первый представляется более вероятным. В общем случае множества рассматриваемых вариантов инновационных элементов и операций для разных этапов функционального цикла могут иметь непустое пересечение.

Подставляя формулу (2) в формулу (1) получаем

$$P = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{k_j} P(A_j | B_j) P(B_j) \right] = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{k_j} r_{ij} q_j \right]. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим процедуры оценки условных вероятностей r_{ij} и безусловных вероятностей q_j из формулы (2).

Условные вероятности r_{ij} полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа с применением для его модернизации j -го инновационного проекта зависит от конкретного состава этого проекта, содержания входящих в нее инновационных элементов и операций и порядка их применения, а также от влияния определяемых их реализацией различных рисков. Оценкам именно этих условных вероятностей посвящены известные методики и модели [2].

Безусловные вероятности q_j применения для модернизации на i -ом этапе функционального цикла j -го инновационного проекта при вычислении вероятности полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа, как правило, оцениваются методом экспертных оценок [3]. Отступать от этого правила нецелесообразно, тем более, что при рациональном планировании инновацион-

ного процесса модернизации системы обеспечения пожарной безопасности величины этих безусловных вероятностей использования различных инновационных проектов, т.е. конкретных комплексов инновационных элементов и операций, являются параметрами и вычисляются однозначно, исходя из максимума вероятности полного обеспечения ПБ по окончании всего функционального цикла в целом, а их оптимальные значения носят характер рекомендуемых в среднем частот применения конкретных инновационных проектов.

Итак, формулы (2) и (3) получены нами без учета влияния различных рисков проводимой модернизации системы обеспечения пожарной безопасности, определяемых используемыми инновационными проектами. Однако на практике [1] наблюдается сильная зависимость вероятности полного обеспечения ПБ по окончании этапа не только от использования того или иного комплекса инновационных элементов и операций, но и от набора, характеристик влияния и условий проявления различных рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность функционирования объекта. Введем в рассмотрение варианты наборов различных рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность функционирования объекта и их проявления на i -ом этапе рассматриваемого функционального цикла, обозначив их события через Π_i ($i=1, \dots, n_i$) с общим числом n_i .

Введем условные вероятности

$$d_{ij} = P(A_i | B_j | \Pi_i)$$

как вероятности полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа исследуемого функционального цикла при использовании j -го инновационного проекта в случае действия t -го варианта набора рисков, дестабилизирующих обеспечение пожарной безопасности. После введения вышеупомянутых величин, условную вероятность полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа функционального цикла с применением j -го инновационного проекта по формуле полной вероятности запишем в виде

$$\begin{aligned} r_{ij} &= P(A_i | B_j) = \sum_{t=1}^{n_i} P(A_i | B_j | \Pi_t) = \\ &= \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} P(\Pi_t) = \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} w_t, \end{aligned} \quad (4)$$

где $w_t = P(\Pi_t)$ – безусловные вероятности действия на i -ом этапе рассматриваемого функционального цикла t -го варианта набора рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность.

В этом случае формула (2) примет вид

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} P(A_i | B_j | \Pi_t) P(B_j) P(\Pi_t) =$$
$$= \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} q_j w_t,$$

а формула (3) в итоге преобразуется в

$$P = \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} P(A_i | B_j | \Pi_t) P(B_j) P(\Pi_t) \right] =$$
$$= \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} q_j w_t \right]$$

Вероятность $w_i = P(\Pi_i)$ действия на i -ом этапе рассматриваемого функционального цикла t -го варианта набора рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность, в общем случае целесообразно определять на основе экспертного опроса опытных сотрудников подразделений пожарной и промышленной безопасности с учетом результатов проводимого соответствующими службами анализа нарушений требований пожарной безопасности, статистики пожаров и загораний на конкретных участках объектов и подразделений за несколько лет.

Следует отметить, что формула (4) определяет вероятность полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа рассматриваемого функционального цикла при условии применения для модернизации его системы обеспечения пожарной безопасности j -го варианта инновационного проекта как ее безусловное математическое ожидание, то есть ее значение, усредненное по различным вариантам набора рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность. Иными словами, если использовать терминологию теории исследования операций [3] формулы (5) и (6) представляют собой выражения для вычисления вероятности полного обеспечения ПБ по окончании функционального цикла и, соответственно, его этапа, с учетом влияния неуправляемых (в смысле теории игр) рисков, дестабилизирующих процесс обеспечения пожарной безопасности.

Таким образом, в формулах (2) и (3) такое противодействие дестабилизирующих факторов, определяемых указанными рисками, переводится из разряда антагонистических в разряд случайных и вероятность полного обеспечения ПБ по окончании i -го этапа рассматриваемого функционального цикла, при условии применения для модернизации системы обеспечения пожарной безопасности j -го варианта инновационного проекта, $P(A_i | B_j)$ фактически усредняется по всевозможным вариантам набора рисков, дестабилизирующих состояние пожарной безопасности.

Такой «усредненный» подход к оценкам $P(A_i | B_j)$ хотя и несколько ее загрубляет, однако оказывается на практике существенно проще в вычислительном смысле. Он позволяет учесть различные варианты проявления и влияния рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность в совокупности, что с учетом сложности оценки безусловных вероятностей $P(\Pi_i)$ проявления t -го варианта набора рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность, позволяет сузить в среднем ущерб от воздействия дестабилизирующих факторов, за счет интегрального их учета в (2) и (3).

Отметим, что после вычисления вероятностей, их можно просто затабулировать и использовать эти таблицы длительное время, поскольку указанные дестабилизирующие факторы и их влияние на систему пожарной безопасности относительно стабильны.

Вывод

Предложенный вероятностно-игровой подход к планированию инновационного процесса модернизации системы обеспечения пожарной безопасности объекта или подразделения позволяет оценить вероятность полного обеспечения ПБ по окончании как всего функционального цикла в целом, так и отдельных его этапов. При этом учитываются частоты применения для модернизации системы обеспечения пожарной безопасности этапов функционального цикла различных вариантов инновационных проектов, т.е. комплексов инновационных элементов и операций, и вероятности проявления рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность, а также условные вероятности полного обеспечения ПБ по окончании этапов функционального цикла.

Такой подход составляет основу для оптимизации использования инвестиционных ресурсов, выделяемых на модернизацию системы обеспечения пожарной безопасности, на основе максимизации вероятности полного обеспечения ПБ по окончании функционального цикла за счет рационального выбора варианта инновационного проекта и нейтрализации влияния рисков, дестабилизирующих пожарную безопасность на каждом этапе функционального цикла.

Литература

1. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1998. 576 с.
3. Горелик В.А. Теория игр и исследование операций. М. МИНХ и ГП, 1978. 94 с.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.3

КОМПЕНСАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В КАНАЛЕ СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛА ТАНГАЖА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ РАКЕТЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДВУХКОНТУРНЫХ СИСТЕМ, ЭКВИВАЛЕНТНЫХ КОМБИНИРОВАННЫМ

COMPENSATION OF RANDOM DISTURBANCES IN THE CHANNEL STABILIZE THE PITCH ANGLE OF A BALLISTIC MISSILE BASED ON THE METHOD OF DUAL CIRCUIT SYSTEMS EQUIVALENT TO THE COMBINED

Елена Юрьевна Пушкарёва
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(915) 192-74-39

Василий Александрович Золотухин
адъюнкт
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (985) 384-84-77
E-mail: vasilii_zol@bk.ru

Аннотация

В статье представлена методика компенсации случайных возмущений в канале стабилизации угла тангажа на основе метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным автоматическим системам. Высокая точность компенсации достигается за счет применения второй формы достижения инвариантности. Произведен расчет контура компенсации, применение которого позволяет сохранить динамическую точность системы, не влияя на ее устойчивость.

Ключевые слова: двухконтурная система, вторая форма достижения инвариантности, контур компенсации, баллистическая ракета, случайные возмущения.

Summary

The article presents a method to compensate for random disturbances in the channel stabilize the pitch angle based on the method of dual circuit systems equivalent to a combined automatic systems. High compensation accuracy is achieved through the use of the second form of achievement of invariance. The calculation of the contour compensation, the use of which allows to preserve the dynamic accuracy of the system without affecting its stability.

Keywords: dual system, the second form of achievement of invariance, the contour compensation, ballistic missile, random disturbance.

Основными возмущающими факторами, действующими на баллистическую ракету в процессе полета, являются: направление и скорость ветра; разброс плотности атмосферы; погрешность определения аэродинамических характеристик; разброс инерционно-центровочных характеристик; погрешности изготовления и монтажа ракеты и двигательных установок; разброс тяги двигателей; перекося и смещение векторов

тяги двигателей; упругие характеристики ракеты и ее отдельных элементов. Некоторые из перечисленных факторов (входящих в правые части уравнений движения ракеты в виде возмущений) могут быть описаны случайными или гармоническими функциями.

Наибольшее влияние на динамику системы стабилизации оказывают такие возмущения как упругость корпуса баллистической ракеты

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

и подвижность (колебания) топлива в баках (для ракет с жидкостными двигателями). Диапазоны частот этих колебаний в большинстве случаев считаются известными [1].

Указанные возмущения, в свою очередь, оказывают влияние на движение центра масс ракеты и ее угловое движение, что может привести к отклонениям ракеты от номинальной траектории.

Для парирования негативного влияния действующих в контуре стабилизации баллистической ракеты случайных возмущений, необходимо осуществлять их компенсацию, при этом важно сохранять динамическую точность отработки программного значения угла тангажа. Естественно, при этом должны соблюдаться условия устойчивости системы.

Учитывая, что случайные возмущения на борту баллистической ракеты непосредственно не измеряются, задача их компенсации будет решаться в рамках теории двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным системам [2, 3]. Структурная схема такой системы в канале стабилизации угла тангажа приведена на рисунке 1. Из рисунка видно, что в системе организовано управление, как сумма управлений по отклоне-

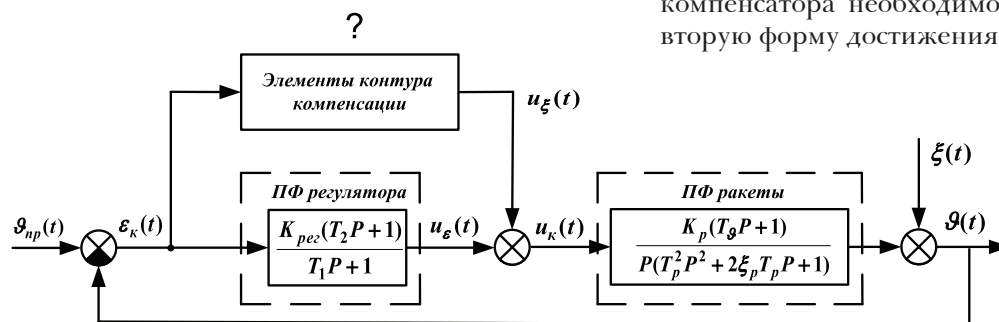


Рис. 1. Двухконтурная система стабилизации угла тангажа ракеты, эквивалентная комбинированной системе

нию текущего значения угла тангажа $\vartheta(t)$ от его программного значения $\vartheta_{np}(t)$ (т.е. управления по ошибке $\varepsilon_k(t)$) и по возмущению $\xi(t)$, действующему на выходе системы, т.е. $u_k(t) = u_\varepsilon(t) + u_\xi(t)$.

Контур управления по ошибке (первый контур) включает в себя блоки передаточных функций (ПФ) баллистической ракеты и регулятора. Ракета представлена передаточной функцией с параметрами: K_p , T_p , ξ_p – коэффициент усиления, постоянная времени и коэффициент демпфирования ракеты соответственно; T_g – аэродинамическая постоянная времени. Регулятор представляет собой физически реализуемый

форсирующий контур с коэффициентом усиления K_{pec} и постоянными времени T_1 и T_2 .

Для решения задачи компенсации случайных возмущений в канале стабилизации угла тангажа необходимо рассчитать параметры элементов второго контура (контура компенсации, рисунок 2).

Согласно методу двухконтурных систем (МДС), задающее (возмущающее) воздействие можно получить косвенно из сигнала ошибки комбинированной системы ε_k на выходе идентификатора. Передаточная функция идентификатора рассчитывается как обратная ПФ по ошибке первого контура, а передаточная функция инвертора представляет собой обратную ПФ объекта управления (баллистической ракеты) без учета интегрирующих звеньев (учет интегрирующих звеньев производится в положительной обратной связи, охватывающей компенсатор).

При решении задачи синтеза параметров компенсатора необходимо ориентироваться на вторую форму достижения инвариантности [2]

$$\begin{cases} A(P)\xi(t) = 0; \\ A(P) = 0; \\ \xi(t) \neq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $A(P) = C(P) - B(P)$ – полином числителя передаточной функции (ПФ) по ошибке;

$\xi(t)$ – случайное возмущение.

Как показано в [2] передаточная функция двухконтурной системы по ошибке при наличии первого порядка астатизма в первом контуре (т.е. контуре управления по отклонению) имеет вид:

$$W_{\varepsilon}^{(2)}(P) = \frac{\varepsilon_\xi(P)}{\xi(P)} = -\frac{A_1(P)}{C_1(P)} \cdot \frac{C(P) - B(P)/P}{C(P)}, P \equiv \frac{d}{dt}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_\xi(P)$ и $\xi(P)$ – изображения ошибки системы и случайного возмущения соответственно; $A_1(P)$ и $C_1(P)$ – полиномы числителя и знаменате-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ля передаточной функции по ошибке первого контура управления;
 $B(P)$ и $C(P)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ разомкнутого фильтра компенсации (компенсатора).

Выражение для ошибки компенсации, вытекающее из (2), имеет вид

$$\varepsilon_\xi(t) = -\frac{A_1(P)}{C_1(P)} \cdot \frac{C(P) - B(P)/P}{C(P)} \cdot \xi(t), P \equiv \frac{d}{dt}, \quad (3)$$

а условие достижения второй формы инвариантности

$$C(P) - B(P)/P = 0, \quad (4)$$

что приводит к нулевой ошибке компенсации.

Общая структура полиномов $B(P)$ и $C(P)$ для компенсации случайных возмущений в системе первого порядка астатизма имеет вид следующего выражения:

$$\begin{cases} B(P) = P(b_1 + b_2P + b_3P^2 + \dots + b_mP^{m-1}); \\ C(P) = c_0 + c_1P + c_2P^2 + \dots + c_nP^n, \end{cases} \quad (5)$$

где «свободный» оператор P в первом выражении осуществляет функцию выравнивания порядков полиномов числителя и знаменателя ПФ компенсатора случайных возмущений, что является необходимым (но не достаточным) условием достижения второй формы инвариантности (см выражение (4)).

Не рассматривая пока вопросы динамической точности, и не учитывая слагаемые высокого порядка, чтобы не усложнять структуру компенсатора, примем полиномы фильтра равными

$$\begin{cases} B(P) = b_1P; \\ C(P) = c_0 + c_1P. \end{cases} \quad (6)$$

Подставив в условие достижения второй формы инвариантности (4) значения полиномов $B(P)$ и $C(P)$ из (6), получим:

$$c_0 + c_1P - b_1P/P = 0 \Rightarrow b_1 = c_0 + c_1P. \quad (7)$$

Для физической реализуемости выражения (7) аппроксимируем его с помощью передаточной функции форсирующего контура:

$$c_0 + c_1P = \frac{1 + T_4P}{1 + T_3P}, T_3 < T_4. \quad (8)$$

где $c_0 = 1$, $c_1 = T_4$.

С учетом выражений (6), (7) и (8) структура и параметры компенсатора примут вид

$$W_{\text{ком}}(P) = \frac{B(P)}{C(P)} = \frac{b_1P}{c_0 + c_1P} = \frac{1 + T_4P}{1 + T_3P} \cdot \frac{P}{c_0 + c_1P}, \quad (9)$$

а его структурная схема представлена на рисунке 3.

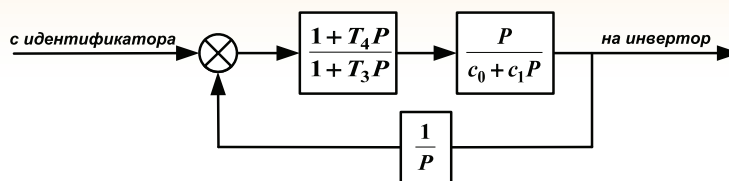


Рис. 3. Структурная схема компенсатора случайных возмущений

Для дальнейшего построения контура компенсации необходимо определить передаточные функции идентификатора и инвертора.

С целью определения передаточной функции идентификатора

$$W_{\text{иден}}(P) = W_\varepsilon^{-1}(P) = \frac{C_1(P)}{A_1(P)} \quad (10)$$

вычислим ПФ по ошибке первого контура как

$$W_\varepsilon(P) = \frac{A_1(P)}{C_1(P)} = \frac{1}{1 + W_p(P)}, \quad (11)$$

где $W_p(P)$ – ПФ разомкнутой системы стабилизации угла тангажа.

Опуская промежуточные вычисления, окончательно получим:

$$\begin{aligned} W_\varepsilon(P) = [T_p^2 T_1 P^4 + (T_p^2 + 2\xi_p T_1 T_p) P^3 + (T_1 + 2\xi_p T_p) P^2 + P] / \\ [T_p^2 T_1 P^4 + (T_p^2 + 2\xi_p T_1 T_p) P^3 + (T_1 + 2\xi_p T_p + T_2 T_g K_v) P^2 + \\ + (1 + (T_2 + T_g) K_v) P + K_v], \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_v = K_{\text{рег}} \cdot K_p$ – коэффициент усиления ракеты по скорости.

Следовательно, полиномы ПФ идентификатора будут иметь вид:

$$\begin{aligned} C_1(P) = T_p^2 T_1 P^4 + (T_p^2 + 2\xi_p T_1 T_p) P^3 + (T_1 + 2\xi_p T_p + T_2 T_g K_v) P^2 + \\ + (1 + (T_2 + T_g) K_v) P + K_v, \\ A_1(P) = T_p^2 T_1 P^4 + (T_p^2 + 2\xi_p T_1 T_p) P^3 + (T_1 + 2\xi_p T_p) P^2 + P. \end{aligned} \quad (13)$$

Передаточная функция инвертора, с учетом принципа физической реализуемости академика Б.Н. Петрова [4], примет следующий вид:

$$W_{\text{инв}}(P) = W_{\text{БР}}^{-1}(P) = \frac{T_p^2 P^2 + 2\xi_p T_p + 1}{K_p (T_g P + 1)(\tau P + 1)}, \tau \ll T_p. \quad (14)$$

С целью оценки эффективности рассчитанного контура компенсации было проведено цифровое моделирование в среде «Simulink» пакета MATLAB. Параметры передаточных функций баллистической ракеты, регулятора и контура компенсации, используемые при проведении моделирования, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры двухконтурной системы при моделировании процесса стабилизации угла тангажа

Параметры	Kv	ξ_p	T1, с	T2, с	T3, с	T4, с	T_g , с	T_p , с	τ , с
Значения параметров	15	0,7	0,05	5	0,05	1	0,9	3	0,01

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

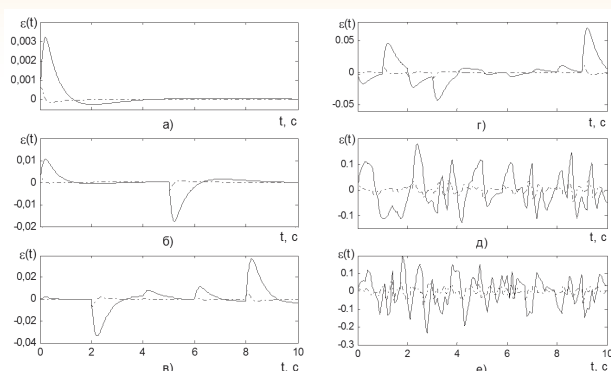


Рис. 4. Графики процессов изменения ошибок системы стабилизации при действии случайных возмущений с различной частотой дискретизации: а – 0,05 Гц; б – 0,2 Гц; в – 0,5 Гц; г – 1 Гц; д – 5 Гц; е – 10 Гц

На рисунке 4 представлено несколько реализаций процесса моделирования системы стабилизации угла тангажа с действующими на выходе системы случайными возмущениями. Штрихпунктирной линией обозначен график изменения ошибки компенсации случайных возмущений; сплошной линией показан график ошибки системы при отсутствии канала компенсации. Возмущения описывались инерционным шумом («белый шум» пропускался через инерционное звено) мощностью 0,1 Вт, при этом генерация шума при каждом воздействии происходила случайным образом. Частота дискретизации шума задавалась в диапазоне 0,05-10 Гц.

Оценка качества компенсации производилась по выражению

$$K_{эф} = \frac{D_{\varepsilon}^{\delta/k}}{D_{\varepsilon\xi}^{c/k}}, D_{\varepsilon\xi} = \frac{I_{кв}}{T}, \quad (15)$$

где $D_{\varepsilon}^{\delta/k}$ – дисперсия ошибки системы без учета компенсации;

$D_{\varepsilon\xi}^{c/k}$ – дисперсия ошибки компенсации с учетом контура компенсации;

$I_{кв} = \int_0^T \varepsilon_{\xi}^2(t) dt$ – квадратичная интегральная оценка качества (ИОК) [5];

T – время моделирования.

Графики изменения ИОК для рассматриваемых реализаций случайного процесса продемонстрированы на рисунке 5.

Из приведенных графиков (рисунки 4,5) видно, что ошибка компенсации случайных возмущений существенно меньше при применении суммарного управления, т.е. с использованием контура компенсации. В таблице 2 приведена обобщенная оценка эффективности компенсации случайных возмущений в канале стабилизации угла тангажа.

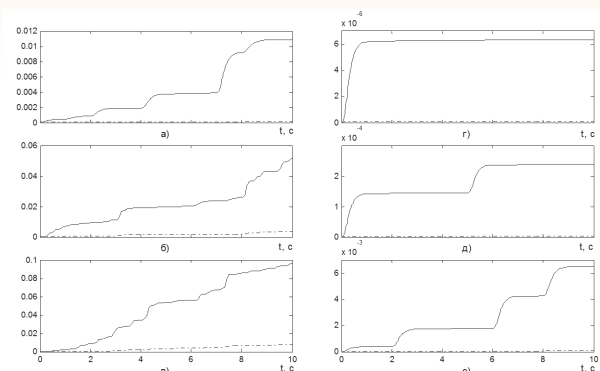


Рис. 5. Графики изменения квадратичных ИОК: сплошная линия – без учета компенсации; штрихпунктирная линия – с учетом компенсации случайных возмущений

Таблица 2

Результаты моделирования двухконтурной системы стабилизации угла тангажа, эквивалентной комбинированной

Диапазон частоты дискретизации, Гц	Среднее значение дисперсии, град		Коэффициент эффективности Кэф
	б/к	с/к	
0,05...1	0,00441	0,000048	91,875
1...10	0,05299	0,00398	13,314

Из анализа полученных результатов следует, что наиболее эффективно удастся добиться компенсации низкочастотных шумов (до 1Гц), шумы с частотой до 10 Гц также компенсируются с хорошим качеством.

Выше были рассмотрены результаты эффективности компенсации при отсутствии задающего полезного воздействия. Однако основная задача состоит в обеспечении инвариантности системы стабилизации угла тангажа относительно действующих возмущений.

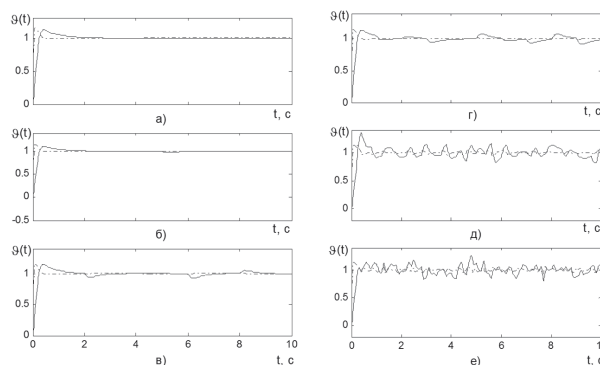


Рис. 6. Графики переходных процессов изменения программного значения угла тангажа

На рисунке 6 приведены графики переходных процессов системы стабилизации при отработке программного значения угла тангажа $\vartheta_{пр}(t) = 1$ град и одновременном воздействии случайных возмущений с прежними параметрами.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

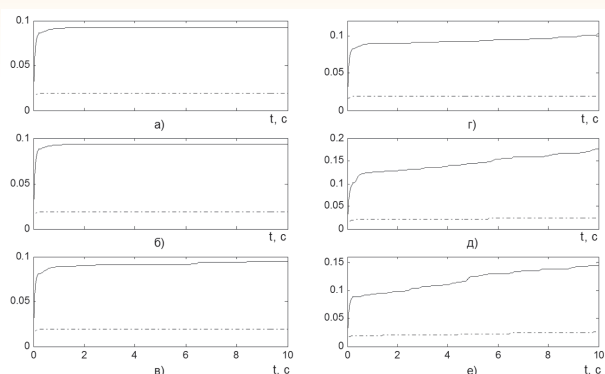


Рис. 7. Графики изменения квадратичных ИОК при обработке полезного задающего воздействия $\mathcal{I}_{np}(t) = 1$ град: сплошная линия – без учета компенсации; штрихпунктирная линия – с учетом компенсации случайных возмущений

На рисунке 7 представлены графики изменения квадратичной ИОК с учетом воспроизведения программного значения угла тангажа.

Результаты моделирования одноконтурной (т.е. без контура компенсации) и двухконтурной систем стабилизации с учетом воспроизведения полезного задающего воздействия показали несомненное преимущество последней. Суммарная ошибка системы при применении контура компенсации значительно меньше, при этом эффективность компенсации случайных возмущений в двухконтурной системе в среднем в 5,5 раз выше. Отличительной особенностью здесь является то, что квадратичная ИОК при моделировании системы с контуром компенсации остается примерно постоянной во времени на всем диапазоне исследуемых частот (от 0,05 до 10 Гц), т.е. можно говорить об инвариантности ошибки системы относительно действующих внешних возмущений, в отличие от системы без контура компенсации, где качество системы существенно зависит от величины возмущений и от времени моделирования (см. рисунок 7).

Выводы

1. Проведенный путем моделирования и теоретических расчетов анализ контура компенсации позволяет сделать вывод о том, что полученные алгоритмы, основанные на применении второй формы достижения инвариантности, вполне реализуемы.

2. В канале стабилизации угла тангажа баллистической ракеты с высокой степенью точности получена частичная инвариантность (независимость) ошибки системы от действия случайных возмущений.

3. Применение предложенной методики позволяет получить систему стабилизации, способную с высоким качеством решать возложенные на нее задачи в условиях действия случайных возмущений. Преимущество такой системы состоит в том, что в ней отсутствует противоречие между точностью и устойчивостью.

Литература

1. Айзенберг Я.Е., Сухоробрий В.Г. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
2. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Методы синтеза следящих и терминальных автоматических систем управления высокой точности: Монография. Серпухов: Филиал ВА РВСН, 2016. 435 с.
3. Пушкарёва Е.Ю. Исследование влияний внешних возмущений на электропривод управления антеннами в космических телекоммуникационных системах // Известия института инженерной физики, 2012. №4(26). С.40-44.
4. Петров Б.Н. Теория автоматического управления: Избранные труды. Т.1. М.: Наука, 1983. 429 с.
5. Пушкарёв Ю.А., Пушкарёва Е.Ю. Теория автоматического управления. Серпухов: МО РФ, 2010. 476 с.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 692.7.016

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ САМОКАЛИБРУЕМОГО АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОЛЕТА

METHOD FOR CONSTRUCTING THE STRUCTURE OF A SELF- CALIBRATING ACCELEROMETER MODULE OF A SPACECRAFT IN LONG-RANGE FLIGHT CONDITIONS

Павел Павлович Евграфьев

аспирант
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: evgraphiev@mail.ru

Анатолий Александрович Нижегородов

кандидат технических наук, профессор
профессор кафедры
филиал ВА РВСН
имени Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(4967)78-96-39
E-mail: nizhegorodov55@rambler.ru

Аннотация

В статье рассматривается задача построения структуры самокалибруемого акселерометрического модуля космического аппарата с алгоритмами диагностирования отказов навигационных датчиков первичной информации и восстановления их работоспособности в условиях длительного полета космического аппарата.

Ключевые слова: структура, акселерометрический модуль, навигационный датчик первичной информации (НДПИ), акселерометр, алгоритм.

Summary

The article deals with the problem of constructing the structure of a self-calibrating accelerometer module of a spacecraft with algorithms for diagnosing failures of navigation sensors of primary information and restoring their operability in conditions of a long flight of a spacecraft.

Keywords: structure, accelerometer module, navigation sensor for primary information, the Primary Information Sensor (PIS), accelerometer, algorithm.

Известно, что в современных структурах управляемых летательных аппаратов (ЛА) в качестве измерителей их линейного движения (навигационных датчиков первичной информации – НДПИ) используются акселерометры (измерители вектора кажущегося ускорения). На борту ЛА необходимо иметь как минимум три одностепенных акселерометра, которые образуют так называемый акселерометрический (измерительный) модуль.

В работах ученых Епифанова А.Д., Назарова Б.И., Разоренова Г.Н., Румянцева Г.Н., Водиче-

вой Л.В., Шолохова А.В. и др. показано, что имеется возможность повышения надежности измерительных данных в системах управления ЛА в виде [1-5]:

- структурного резервирования акселерометров;
- функционального резервирования акселерометров;
- возможности компенсации различных скоростей дрейфа параметров акселерометрических датчиков во время полета летательного аппарата.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Однако в рамках существующего подхода эти ресурсы недоступны или используются с недостаточной степенью эффективности по причине малого количества уравнений связей между наблюдаемыми параметрами при использовании только структурного резервирования акселерометров и как следствие невозможности использования второго и третьего источника ресурсов.

В настоящее время, для периодического определения дрейфа параметров акселерометров, чаще всего, используются наземные (в том числе и предстартовые) калибровки. В качестве эталонов для процесса калибровок НДПИ используются ускорения силы тяжести Земли в месте калибровок.

Таким образом, для управляемого космического аппарата (КА) в условиях длительного полета возникает противоречие: с одной стороны – нарастание погрешностей акселерометров требует проведения их калибровок и отсутствием эталонов в условиях полета КА для этого процесса, с другой.

Главная идея самокалибруемости акселерометрического модуля КА в условиях длительного полета заключается в том, чтобы на основе исправных НДПИ определить эталонный (входной) сигнал для калибруемого акселерометра.

Поэтому, разрабатываемая методика построения структуры самокалибруемого акселерометрического модуля системы управления (СУ) космического аппарата с различной степенью избыточности датчиков должна позволять для различного количества акселерометров оптимизировать значения их углов ориентации входных осей по точностному показателю работоспособности; получать дополнительные уравнения связей (алгоритмы диагностирования отказов акселерометров и алгоритмы восстановления информации отказавших датчиков), обеспечивающих требуемые показатели точности и надежности работы таким акселерометрическим модулям за счет процедур калибровок НДПИ во время полета КА. В синтезируемых структурах акселерометрических модулей определим основные и резервные НДПИ (рисунок 1).

Входные оси основных акселерометров, обозначенные X, Y, Z , взаимно перпендикулярны в пространстве, в отличие от осей резервных $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S$. Разработка структур акселерометрических модулей СУ сводится к решению задачи определения ориентации входных осей резервных НДПИ по отношению к основным.

Выбор оптимальных структур акселерометрических модулей из всего многообразия возможных был осуществлен на основе морфологического анализа [6], сущность которого заключа-

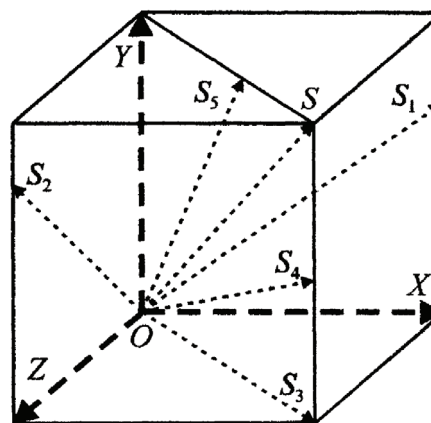


Рис. 1. Схема ориентации направлений входных осей акселерометров

лась в том, что любое направление должно иметь не менее двух резервных направлений. Считая три НДПИ основными – по направлениям X, Y, Z , приведем некоторые возможные структуры акселерометрических модулей, дополнив их резервными (рисунок 1):

При использовании функционального резервирования и девяти НДПИ наибольшее число измерительных направлений равно девяти, а наименьшее – четырем. Далее перечислим возможные варианты частных решений, реализующих конкретное число измерительных направлений. Эту операцию для наглядности оформим в виде таблицы 1.

Общее число вариантов частных решений равно девятнадцати. Далее, в соответствии с методом морфологического анализа, выдвигаются технические требования к структуре измерительного модуля, и проводится анализ качества выполнения выдвинутых требований по строкам таблицы 1, после чего получаем таблицу 2 – результатов оценки частных решений, где приведены результаты оценки различных структур измерительных блоков по двухбалльной системе: 1 – обязательное требование удовлетворяется; 0 – обязательно требование не удовлетворяется. Таким образом, общее число возможных комбинаций сократилось с 19 до 5: B_2, B_3, B_4, B_1, B_2 .

Далее производится попарное сопоставление решений, которые сравниваются относительно дополнительных требований, например, простоты алгоритмов восстановления вектора кажущегося ускорения, при возникновении в измерительном модуле отказов акселерометров.

Так, анализ частных решений показал схожесть структур измерительных модулей B_2, B_3, B_4 между собой, а также структур B_1 и B_2 . С учетом дополнительного требования предпочтение отдается структурам B_1 и B_2 , так как в них осу-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Таблица 1
Варианты частных решений

Измерит. модуль	Число измерит. направлений	Варианты частных решений			
		1	2	3	4
А	4	S ₁ -6	S ₂ -6	S ₃ -6	S-6
Б	5	S ₄ -3 S ₅ -3	S ₁ -3 S ₂ -3	S ₂ -3 S ₃ -3	S1-3 S3-3
В	6	X,Y,Z, S ₁ , S ₂ , S ₃ -по 1	S ₁ , S ₂ , S ₃ -по 2	X,Y,Z,S4, S5,S-по 1	S4,S5,S-по2
Г	7	S ₁ , S ₂ , S ₃ -по 1, S-3	X,Y,Z, S ₁ , S ₂ , S ₃ ,S-по 1	Все четыре направл. в пространстве	-
Д	8	S ₁ , S ₂ , S ₃ ,S ₄ ,S ₅ ,S-по 1	Все пять направл. в пространстве	-	-
Е	9	S ₁ ,S ₂ ,S ₃ ,S ₄ ,S ₅ ,S-по 1	Все шесть направл. в пространстве	-	-

Таблица 2
Результаты оценки частных решений:

Обязательные технические требования	Частные решения															
	А 4	Б 1	Б 2	Б 3	Б 4	В 1	В 2	В 3	В 4	Г 1	Г 2	Г 3	Д 1	Д 2	Е 1	Е 2
Обеспечение трехкратного резервирования НДПИ в каждом измерительном направлении	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Наличие уровней связи по выходным сигналам не более трех НДПИ	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Допустимые варианты	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ществляется не только резервирование на уровне акселерометров, но также резервируются измерительные направления. Структуры *В1* и *В2* во многом схожи, в связи с чем отпадает необходимость рассмотрения обеих структур. В дальнейшем рассматривается акселерометрический модуль *КА* со структурой *В1*.

Таким образом, построение структуры акселерометрического модуля системы управления космического аппарата с различной степенью избыточности датчиков на основе морфологического анализа учитывает дополнительные ограничения в виде равенств, полученные на основе измерительной информации и параметрах акселерометров (масштабных коэффициентов и углов взаимной ориентации их входных осей), обеспечивающих отказоустойчивость акселерометрическому модулю при появлении в нем отказов функционально-резервируемых датчиков. В работах [1, 4, 7] показано, что «чисто» функциональное резервирование применяется для измерительного модуля с 4, 5, 6 или 7 акселерометров (см. таблицу 3). Для измерительного модуля из 8 и 9-ти акселерометров применяется структурное и функциональное резервирование одновременно.

В таблице 3 приведено: *x, y, z, S1, S2, S3, S4, S5, S* – ориентация входных осей основных и резервных акселерометров.

Таблица 3
Виды резервирования акселерометров для различных структур навигационных модулей

Число акселером. (n)	Вид резервирования	Число избыточных акселерометров (m)	Число измерительных направлений
9	Смеш.	6	6 (x, y, z, S1, S2, S3)
8	Смеш.	5	4 (x, y, z, S)
7	Функц.	4	7 (x, y, z, S1, S2, S3, S)
6	Функц.	3	6 (x, y, z, S1, S2, S3,)
5	Функц.	2	5 (x, y, z, S4, S5)
4	Функц.	1	4 (x, y, z, S)

Смешанное резервирование означает, что наряду с функциональным применяется и структурное резервирование.

Построение алгоритмов идентификации отказов акселерометров на этапе полета *КА* было осуществлено на основе комбинации разностных уравнений (уравнений связей), получаемых на основе знания функциональных зависимостей между выходными сигналами акселерометров, их масштабными коэффициентами и углами взаимной ориентации входных осей датчиков [4, 7].

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$\left| C_9^D(\alpha_{i,j})X_9 - Y_9 \right| \leq E_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где Y_9 – матрица измерений по результатам основных датчиков;

X_9 – матрица измерений по результатам резервных датчиков;

$E_{\text{доп}}$ – матрица допустимых погрешностей акселерометров;

C_9^D – обобщенная матрица коэффициентов.

Если каждому из девяти разностному уравнению согласно (1) поставить в соответствие неравенство $[\Delta Y_i] \leq \varepsilon_{\text{доп}}$, то можно ввести логическую переменную X_k принимающую значение равно единице, в случае соответствия характеристики полю допусков и равно нулю в противном случае.

Из логических переменных X_k формируется логическая функция f_9 , представляющая собой конъюнкцию в виде: $f = \bigwedge_{k=1}^9 X_k$. Оценка технического состояния акселерометра проводится в зависимости от значения функции f : в случае равенства ее единице акселерометр считается исправным, в случае равенства нулю – отказавшим.

Получение алгоритмов восстановления выходного сигнала (2) и масштабного коэффициента (3) отказавшего акселерометра (дополнительных уравнений связей) осуществляется за счет реорганизации полученных ранее алгоритмов диагностирования отказов акселерометров (1), а именно, путем принудительного приравнивания допустимой погрешности работы отказавшего датчика к нулю и вычисления его реальной погрешности работы по показаниям исправных датчиков, т.е. осуществления калибровки акселерометров во время полета КА [8].

$$Y_i^0 = C_9^B Y_i^u, \quad (2)$$

где Y_i^0 – матрица значений восстанавливаемых сигналов в случае отказов датчиков;

Y_i^u – матрица измерений по результатам исправных датчиков;

C_9^B – обобщенная матрица коэффициентов.

Восстановление масштабных коэффициентов двух отказавших акселерометров, производится в измерительном модуле содержащем девять, восемь или семь датчиков, а одного масштабного коэффициента – в измерительных модулях из шести, пяти или четырех акселерометров.

$$K_i^0 = A_9^B K_i^u, \quad (3)$$

где K_i^0 – матрица значений восстанавливаемых масштабных коэффициентов в случае отказов датчиков;

K_i^u – матрица значений масштабных коэффициентов исправных датчиков;
 A_9^B – обобщенная матрица выходных сигналов датчиков.

Выводы

Разработанная методика позволила синтезировать целый ряд конкретных структур самокалибруемых акселерометрических модулей систем управления КА с различным числом функционально-резервируемых датчиков (от 4 до 9) и алгоритмов обработки измерительной информации во время его полета, позволяющая повысить коэффициент отказоустойчивости для акселерометрического модуля: при одном отказе датчика с 0,11 до 0,25, а при двух отказах – с 0,22 до 0,29. Кроме того, имеется возможность проведения самокалибровок акселерометров, показания которых вышли за допустимые погрешности, т.е. восстановления их работоспособности во время полета космического аппарата.

Литература

1. Епифанов А.Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами. Монография. М.: Машиностроение, 1978. 145 с.
2. Беркович С.Б., Шолохов А.В. Основы теории пилотажно-навигационных систем. Учебное пособие. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2016. 207 с.
3. Макаренченко Ф.И., Румянцев Г.Н. Калибровка чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы в полете. Научно-технический журнал «Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления». М.: ФГУП НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина. № 3, 2011. С. 16-23.
4. Нижегородов А.А., Шолохов А.В. Повышение отказоустойчивости измерительных модулей систем управления подвижных объектов на основе функционального резервирования датчиков // Измерительная техника, 2001. №11. С. 7-11.
5. Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями): Учебник для вузов / Г.Н. Разоренов, Э.А. Бахрамов, Ю.Ф. Титов; Под ред. Г.Н. Разоренова. М.: Машиностроение. 2003. 584 с.
6. Раков Д.А., Торбек Х.Ю. Структурный синтез перспективных космических систем // Проблемы ракетной и космической техники. Труды ХЛТ чтений. Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2007. С. 110-121.
7. Нижегородов А.А., Евграфьев П.П. Алгоритмы диагностирования отказов датчиков первичной информации в избыточном акселерометрическом модуле летательного аппарата // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, 2017. №4(42). С. 59-63.
8. Нижегородов А.А., Евграфьев П.П. Алгоритмы восстановления работоспособности отказавших датчиков первичной информации во время полета летательного аппарата // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, 2017. №4(42). С. 64-68.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 537.32:621.311

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ И ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРОВОЛОКНА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

METHOD OF OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIVE-COMPONENT AND THERMAL-ELECTRICAL PARAMETERS OF HEAT ELECTRIC FIBER FOR THE PROTECTION OF HIGH VOLTAGE WIRES OF THE AIR TRANSMISSION LINE FROM ICING

Мария Михайловна Авдеева

инженер
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: knyazeva_mariya@list.ru

Олег Вениаминович Коровин

кандидат технических наук, доцент
начальник управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: kov67@iifmail.ru

Евгений Михайлович Ананьев

почетный работник науки и техники РФ
член-корреспондент АИО
кандидат технических наук, доцент
Первый Вице-президент Института –
Первый заместитель генерального директора
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Сергей Владимирович Подвигин

кандидат технических наук, доцент
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: podviginsv@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена методу оптимизации конструктивно-компоновочных и теплоэлектрических параметров термоэлектроволокна для защиты высоковольтных проводов воздушной линии электропередач от обледенения. Метод, рассматриваемый в статье, является основой единого методического подхода к совместной оптимизации конструктивно-компоновочных и теплоэлектрических параметров термоэлектроволокна, которая проводится с помощью методики расчета конструктивно-компоновочных параметров термоэлектроволокна и модели его функционирования в составе воздушной линии электропередач при проведении параметрического синтеза технического облика перспективной линии электропередач, включающий в свой состав связку «термоэлектроволокно+высоковольтные провода».

Ключевые слова: термоэлектроволокно, оптимизация, погрешность, корректировка ошибки, поиск экстремума, уточнение функции.

Summary

The article is devoted to the method of optimizing the construction-layout and thermoelectric parameters of thermoelectric fibers for protecting high-voltage wires of the overhead power transmission line from icing. The method considered in the article is the basis of a unified methodical approach to the joint optimization of design and layout and thermoelectric parameters of thermoelectric fibers, which is carried out using the technique of calculating the structural and layout parameters of thermoelectric fibers and the model of its functioning as part of an overhead power transmission line for parametric synthesis of the technical appearance of a prospective power line, including in its composition a bundle of «thermoelectric fibers + high-voltage wires».

Keywords: thermoelectric fiber, optimization, error, error correction, extremum search, refinement of function.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Использование термоэлектроволокна (ТЭВ) является одним из перспективных методов защиты воздушных линий электропередач (ВЛЭП) от обледенения, который позволяет гарантированно исключить негативные последствия, связанные с образованием гололеда на высоковольтных проводах (ВВП), в линиях электроснабжения особо важных потребителей электроэнергии.

Выбор оптимальных параметров ТЭВ для защиты ВВП ВЛЭП проводится в ходе многоэтапных исследований, имеющих своей целью обоснование рационального технического облика всей государственной системы энергоснабжения (ГСЭС), и является одной из актуальных частных задач таких исследований.

При обосновании требований к ТЭВ необходимо определить оптимальный вектор варьируемых параметров ТЭВ (\vec{x}_{opt}):

- параметры тока обогрева ТЭВ (диапазон изменения, дискретные оптимальные значения для заданных условий);

- параметры материала ТЭВ, которые, в свою очередь, будут определять электрические и теплофизические параметры ТЭВ (электрическое сопротивление, теплопроводность, температуропроводность, коэффициент рассеяния тепловой энергии, теплоемкость, КПД преобразования электрической энергии в тепловую и т.д.);

- конструктивно-компоновочную схему «ВВП+ТЭВ» (расположение ТЭВ относительно ВВП, шаг намотки, плотность намотки, толщина ТЭВ, относительная длина ТЭВ (по отношению к длине ВВП) и т.д.);

- стоимостные параметры (стоимость разработки, производства и эксплуатации) ТЭВ в составе ВЛЭП.

Оптимизация параметров термоэлектроволокна (ТЭВ) перспективных ВЛЭП заключается в определении минимума (максимума) функции $F(\vec{x})$, устанавливающей зависимость выбранного показателя ТЭВ от его варьируемых параметров $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$F(\vec{x}) \rightarrow \min(\max) \text{ при } \vec{x} \in X \quad (1)$$

где X - область допустимых значений вектора \vec{x} .

Для решения задачи вида (1) в настоящей работе выбран метод ψ -преобразования, разработанный В.К. Чичинадзе [1]. Особенностью метода является определение глобального по области X экстремума функции $F(\vec{x})$ с помощью дополнительно вводимых функций $\psi(\xi)$ и $\chi_1(\xi)$, $\chi_2(\xi)$, ..., $\chi_n(\xi)$, которые являются одномерными независимо от размерности вектора \vec{x} [2].

В основе ψ -преобразования лежит определение меры множества E^* , на котором $F(\vec{x})$

превосходит заданное значение ξ . Для этого интервал изменения значений функции $F(\vec{x})$, определенной на множестве E , разбивается уровнями:

$$\min F(\vec{x}) < \xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_v < \dots < \xi_{k-1} < \xi_k < \max F(\vec{x}) \quad (2)$$

Для v -го уровня определяется мера такого множества E_v^* , что

$$E_v^* = \{ \vec{x} : F(\vec{x}) \geq \xi_v \} \subset E \quad (3)$$

и эта мера приравняется к значению функции $\psi(\xi)$ на v -м уровне:

$$\psi(\xi_v) = m(E_v^*) \quad (4)$$

В случае многоэкстремальной функции $F(\vec{x})$ множество E_v^* состоит из непересекающихся подмножеств. Как правило, с приближением ξ к уровню $\xi^* = \max F(\vec{x})$, число подмножеств уменьшается до одного, которое затем стягивается в точку \vec{x}^* , в которой находится глобальный экстремум [3, 4].

Основное свойство преобразованной функции $\psi(\xi)$ заключается в том, что она всегда монотонно убывает, причём $\psi(\xi^*) = 0$.

В процессе преобразования одновременно с $\psi(\xi)$ строятся координатные функции $\chi_1(\xi)$, $\chi_2(\xi)$, ..., $\chi_n(\xi)$. Они получаются в результате анализа значений координат x_1, x_2, \dots, x_n , при которых выполняется условие $F(\vec{x}) \geq \xi_v$. Функции $\chi_j(\xi)$, $j=1, n$ отражают изменение некоего «центра тяжести» множества E_v^* при изменении уровня ξ_v . В общем случае эти функции могут не являться монотонными, однако, введение дополнительных весовых функций $\rho[\xi, \vec{x}]$ позволяет сглаживать функции $\chi_j(\xi)$.

Благодаря своим свойствам функции $\psi(\xi)$ и $\chi_j(\xi)$ могут использоваться для оптимизации в случаях, когда функция $F(\vec{x})$ не всюду дифференцируемая (в том числе в точке экстремума), терпит разрывы, в случае, когда экстремум не является внутренней точкой, а также при наличии нескольких экстремумов.

Значение функции $\psi(\xi)$ определяется путём вычисления интеграла:

$$\psi(\xi_v) = \int \dots \int_E \Theta(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n, \quad (5)$$

где $\Theta(x_1, \dots, x_n)$ – характеристическая функция, равная единице, если $F(x_1, \dots, x_n) \geq \xi_v$, или нулю в противном случае. При использовании дополнительных весовых функций $\rho[\xi, \vec{x}]$, получаем:

$$\psi(\xi_v) = \int \dots \int_E \rho[\xi, \vec{x}] \Theta(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n. \quad (6)$$

Сглаживающая функция определяется в виде:

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$\rho[\xi, \bar{x}] = F(\bar{x}) \quad \text{или} \quad \rho[\xi, \bar{x}] = [F(x) - \xi]^g, \quad (7)$$

$g = 1, 2 \text{ и т.д.}$

Интегралы (5) и (6) вычисляются с помощью статистических испытаний, а основным способом построения функций $\psi(\xi)$ и $\chi_j(\xi)$ является поточечный расчёт с последующей аппроксимацией. Функция $\psi(\xi)$ аппроксимируется по точкам ξ_v ($v=1, 2, \dots, k$) с помощью метода наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов заключается в определении параметров полинома $\varphi(\xi)$, при которых

$$\sum_{v=1}^k [\varphi(\xi_v) - \psi(\xi_v)]^2 = \min \quad (8)$$

Минимум можно определить дифференцированием последнего уравнения по параметрам a_0, a_1, \dots, a_n многочлена

$$\varphi(\xi) = a_0 \xi^m + a_1 \xi^{m-1} + \dots + a_{m-1} \xi + a_m \quad (9)$$

и приравняв к нулю частных производных:

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - \varphi(\xi_v, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)] \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_0} \right\} &= 0, \\ \sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - \varphi(\xi_v, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)] \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_1} \right\} &= 0, \quad (10) \\ \sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - \varphi(\xi_v, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m)] \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_m} \right\} &= 0 \end{aligned}$$

Для рассматриваемого случая наиболее подходящей является параболическая аппроксимация. Тогда выражение (9) принимает следующий вид:

$$\varphi(\xi) = a_0 \xi^2 + a_1 \xi + a_2, \quad (11)$$

то

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_0} = \xi^2, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial a_1} = \xi, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial a_2} = 1$$

и

$$\sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - (\alpha_0 \xi_v^2 + \alpha_1 \xi_v + \alpha_2)] \xi_v^2 \right\} = 0, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - (\alpha_0 \xi_v^2 + \alpha_1 \xi_v + \alpha_2)] \xi_v \right\} &= 0, \\ \sum_{v=1}^k \left\{ [\psi(\xi_v) - (\alpha_0 \xi_v^2 + \alpha_1 \xi_v + \alpha_2)] \right\} &= 0, \quad (13) \end{aligned}$$

После некоторых преобразований, принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v &= M_1[\xi], \quad \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v^4 = M_4[\xi], \\ \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v^2 &= M_2[\xi], \quad \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \psi(\xi_v) = M_1[\psi], \\ \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v^3 &= M_3[\xi], \quad \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v \psi(\xi_v) = M_{1,1}[\xi, \psi], \\ \frac{1}{k} \sum_{v=1}^k \xi_v^3 \psi(\xi_v) &= M_{2,1}[\xi, \psi], \quad (14) \end{aligned}$$

получаем

$$\begin{aligned} M_4[\xi] \alpha_0 + M_3[\xi] \alpha_1 + M_2[\xi] \alpha_2 &= M_{2,1}[\xi, \psi], \\ M_3[\xi] \alpha_0 + M_2[\xi] \alpha_1 + M_1[\xi] \alpha_2 &= M_{1,1}[\xi, \psi], \\ M_2[\xi] \alpha_0 + M_1[\xi] \alpha_1 + M_0[\xi] \alpha_2 &= M_{0,1}[\xi, \psi], \quad (15) \end{aligned}$$

где $M_1[\xi]$ и $M_1[\psi]$ — математические ожидания случайных величин ξ и $\psi(\xi)$;

M_2, M_3 и M_4 — моменты второго, третьего и четвертого порядка соответствующих случайных величин ξ и $\psi(\xi)$;

$M_{1,1}$ и $M_{2,1}$ — корреляционные моменты;

$M_0[\xi] = 1, M_{0,1}[\xi, \psi] = M_1[\psi]$.

Решая систему (15), находим коэффициенты α_0, α_1 и α_2 , параболы. Определяя нуль функции $\varphi(\xi)$, находим скалярное значение глобального минимума.

В данном случае характерной особенностью задачи аппроксимации является то, что нас интересует не равномерная аппроксимация, а возможно лучшее приближение функции в одной точке, а именно в точке, где $\varphi(\xi) = 0$ [1].

Для рассматриваемого случая функция $\varphi(\xi)$ аппроксимируется по точкам ξ_v ($v=1, 2, \dots, k$) с помощью метода наименьших квадратов.

Для этого определяются такие α_0, α_1 и α_2 , при которых

$$\sum_{v=1}^k [\varphi(\xi_v) - \psi(\xi_v)]^2 = \min \quad (16)$$

Приравняв к нулю частных производных суммы (16) по коэффициентам α_0, α_1 и α_2 получается система уравнений:

$$\begin{cases} m_4 \alpha_0 + m_3 \alpha_1 + m_2 \alpha_2 = M_2 \\ m_3 \alpha_0 + m_2 \alpha_1 + m_1 \alpha_2 = M_1 \\ m_2 \alpha_0 + m_1 \alpha_1 + k \alpha_2 = M_0 \end{cases} \quad (17)$$

где $m_1 = \sum_{v=1}^k \xi_v$; $m_2 = \sum_{v=1}^k \xi_v^2$; $m_3 = \sum_{v=1}^k \xi_v^3$; $m_4 = \sum_{v=1}^k \xi_v^4$; $M_0 = \sum_{v=1}^k \psi(\xi_v)$; $M_1 = \sum_{v=1}^k \psi(\xi_v) \cdot \xi_v$;

$$M_2 = \sum_{v=1}^k \psi(\xi_v) \xi_v^2$$

В результате решения системы уравнений (17) определяются коэффициенты α_0, α_1 и α_2 .

Аналогично осуществляется аппроксимация координатных функций параболami

$$\bar{\chi}_j(\xi) = \beta_{0j} \xi^2 + \beta_{1j} \xi + \beta_{2j}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Величина экстремума ξ^* определяется как корень уравнения

$$\alpha_0 \xi^2 + \alpha_1 \xi + \alpha_2 = 0 \quad (19)$$

а его координаты рассчитываются с помощью функций:

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$x_j^* = \beta_0^j \xi^{*2} + \beta_1^j \xi^* + \beta_2^j. \quad (20)$$

Таким образом, алгоритм оптимизации методом ψ -преобразования включает следующие операции:

1) выбор значений x_1, x_2, \dots, x_n по случайному закону с равномерным распределением;

2) вычисление в допустимой точке $\vec{x} \in X$ значения функции $F(\vec{x})$, а если $\vec{x} \in X$, то осуществляется возврат к операции 1;

3) повторение операций 1 и 2 до получения s значений функции $F(\vec{x}_q)$, $q=1, s$;

4) определение верхнего $\sup F$ и нижнего $\inf F$ значения среди s значений $F(\vec{x}_q)$;

5) выделение k уровней в интервале $[\frac{\sup F - \inf F}{2}, \sup F]$: $\xi_v = \xi' + (v-1) \cdot \Delta \xi$, $v=1, k$
где $\xi' = \frac{\sup F - \inf F}{2}$; $\Delta \xi = \frac{\sup F - \xi'}{k}$ (21)

6) расчёт значения функции $\psi(\xi)$ для каждого уровня:

$$\psi(\xi_v) = \frac{1}{s} \cdot \sum_{q=1}^s [F(\vec{x}_q) - \xi_v]^g \cdot \Theta(\vec{x}_q, \xi_v), \quad (22)$$

где $\Theta(\vec{x}_q, \xi_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } F(\vec{x}_q) \geq \xi_v \\ 0, & \text{если } F(\vec{x}_q) < \xi_v; \end{cases}$

7) аппроксимация функции $\psi(\xi)$ по значениям $\psi(\xi_v)$ ($v=1, k$) параболой $\varphi(\xi)$;

8) расчёт значений функции $\chi_j(\xi)$ для каждого уровня:

$$\chi_j(\xi_v) = \frac{\sum_{q=1}^s x_{jq} [F(\vec{x}_q) - \xi_v]^g \cdot \Theta(\vec{x}_q, \xi_v)}{\sum_{q=1}^s [F(\vec{x}_q) - \xi_v]^g \cdot \Theta(\vec{x}_q, \xi_v)}; \quad (23)$$

9) аппроксимация функций $\chi_j(\xi)$ по значениям $\chi_j(\xi_v)$ параболой $\bar{\chi}_j(\xi)$;

10) прогнозирование ξ^* путём определения корня уравнения (19);

11) определение положения экстремума $\vec{x}_1^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ подстановкой ξ^* в функции $\bar{\chi}_j(\xi)$;

12) расчёт значения функции $F^* = F(\vec{x}^*)$;

13) сравнение значения F^* со значением ξ^* .

Если F^* и ξ^* практически совпадают, то оптимизация завершается и принимается, что $\max F(\vec{x}) = F^*$. При заметном расхождении и рекомендуется:

- скорректировать ошибку определения значения F^* варьированием значения ξ^* в плоскостях $(x_j, F(x_j))$;

- продолжить оптимизацию в локализованной окрестности полученного решения \vec{x}^* ;

- продолжить оптимизацию из точки \vec{x}^* другим методом.

На рисунке 1 показано, как за счёт изменения

ξ^* на величину Δ координата корректируется с x_j^* до x_j в направлении к действительному положению экстремума, что даёт прирост оптимизируемой функции с $F(x_j^*)$ до $F(x_j)$.

Как правило, корректировка осуществляется изолированно в плоскостях $(x_j, F(x_j))$. Фактически это означает продолжение поиска релаксационным методом (с поочерёдным улучшением координат). Трудоемкость такого поиска возрастает пропорционально размерности вектора \vec{x} . Та же проблема возникает и при попытке улучшения решения градиентным методом, когда могут дополнительно добавиться проблемы ограничений на вид функции $F(\vec{x})$.

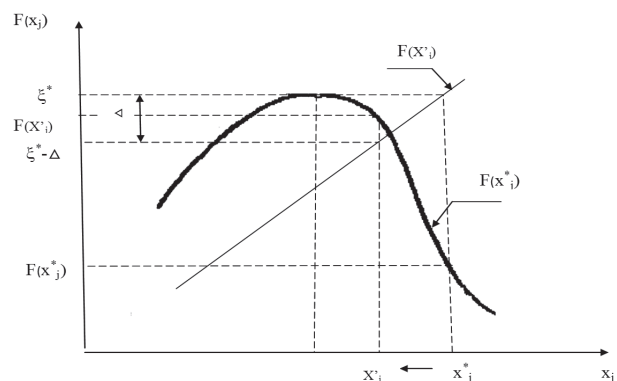


Рис.1. Корректировка ошибки определения оптимального значения переменной x_j

Для локализации поиска экстремума может использоваться приём, описанный в работе [5]. Он заключается в том, что область поиска для очередной итерации формируется путём фиксирования наименьших и наибольших значений координат x_{jq} , при которых в предыдущей итерации значения $F(\vec{x}_q)$ превосходили последний уровень ξ_k .

Для решения задач оптимизации параметров ТЭВ можно использовать модифицированный метод ψ -преобразования со следующими изменениями вычислительной схемы.

1. После проведения серии статистических испытаний полученные точки x_q упорядочиваются так, чтобы:

$$(q_2 > q_1) \rightarrow (F(\vec{x}_{q_2}) \geq (F(\vec{x}_{q_1})) \quad (24)$$

Такое ранжирование позволяет сократить расчёты при построении функций $\varphi(\xi)$ и $\bar{\chi}_j(\xi)$. Теперь при расчёте $\psi(\xi_v)$ и $\chi_j(\xi_v)$ отбрасываются без проверки все уже просмотренные точки, в которых $F(\vec{x}) \leq \xi_{v-1}$. После отыскания первой точки $\vec{x}^q \in E_v^*$, для которой $F(\vec{x}) \geq \xi_v$, все остальные точки с большими номерами также включаются в E_v^* без оценки значения функции $\Theta(\vec{x}_q, \xi_v)$.

Благодаря ранжированию локализация

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

области поиска экстремума выполняется более гибко не по верхнему уровню ξ_k , а по заданной лучшей части испытаний проведённой серии. При этом, например, исключается вырождение области поиска в случае превышения ξ_k лишь в одном или двух испытаниях.

В первых итерациях за счёт выбора значительной части «хороших» результатов локализация замедляется, чтобы не потерять экстремум. В заключительных итерациях локализация ускоряется за счёт выбора малой части лучших результатов, по которым определяется новая область поиска.

Дополнительное сокращение трудоёмкости расчётов даёт зачисление лучших результатов проведённой серии испытаний в счёт очередной серии.

2. При корректировке ошибки расчёта значения F^* варьирование значения ξ^* осуществляется не изолированно в каждой плоскости $(x_j, F(x_j))$, а во всех n плоскостях одновременно. Благодаря этому трудоёмкость корректировки, как и процедуры ψ -преобразования, практически не зависит от размерности \vec{x} .

В ходе корректировки после подбора удачного направления поиска производятся вычисления функции $F(\vec{x})$ при постепенно возрастающем шаге. Обследование окрестности точки ξ^* сводится всего к одному или двум пробным шагам (в сторону возрастания и убывания ξ). Когда значение $F(\vec{x})$ в выбранном направлении ухудшается, шаг уменьшается. После уменьшения шага до заданной малой величины корректировка прекращается.

3. В том случае, если по результатам i -й итерации координата x_j^* оказывается вблизи, либо за границей области поиска, новая граница для $(i+1)$ -й итерации отодвигается в сторону расширения этой области:

$$(x_j^* > x_{j \max}^i) \longrightarrow x_{j \max}^{i+1} = 2x_j^* - x_{j \max}^i \quad (25)$$

$$(x_j^* < x_{j \min}^i) \longrightarrow x_{j \min}^{i+1} = 2x_j^* - x_{j \min}^i$$

$$(x_{j \max}^i - x_j^* < \varepsilon_j) \longrightarrow x_{j \max}^{i+1} = x_{j \max}^i + 10\varepsilon_j$$

$$(x_j^* - x_{j \min}^i < \varepsilon_j) \longrightarrow x_{j \min}^{i+1} = x_{j \min}^i - 10\varepsilon_j$$

где $\varepsilon_j = 0,001 \dots 0,01(x_{j \max}^i - x_{j \min}^i)$ (26)

Благодаря этому приёму корректируется ошибка назначения границ области поиска в i -ой итерации.

4. В случае больших значений $\psi(\xi_k)$ значение экстремума ξ^* может определяться с

повышенной погрешностью. Для её уменьшения в интервале $[supF, \xi_k]$ вводятся дополнительные уровни ξ_{k+1}, ξ_{k+2} , и т.д. с одновременным исключением из рассмотрения нижних уровней ξ_1, ξ_2 и т.д., вносящих наибольшую погрешность при аппроксимации функций $\psi(\xi)$ и $\chi_j(\xi)$.

Благодаря такому приёму, как показано на рисунке 2, уточняется характер изменения $\varphi(\xi)$ и $\bar{\chi}_j(\xi)$ в окрестности ξ^* . Если с приближением очередного добавленного уровня вплотную к $supF$ величина $\psi(\xi)$ для него остаётся большой, делается вывод, что экстремум лежит в гиперплоскости и $maxF(x) = supF$.

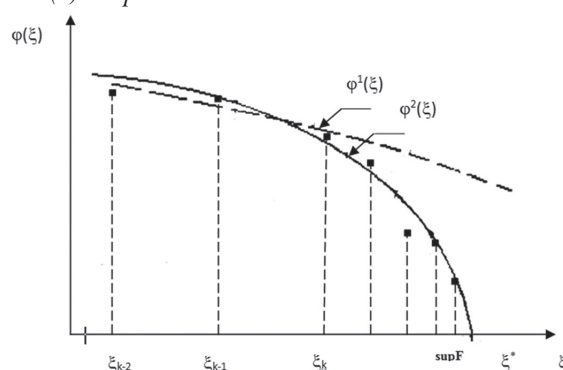


Рис. 2. Уточнение функции $\varphi(\xi)$ путём добавления дополнительных уровней в диапазоне $[\xi_k, supF]$

5. Вследствие погрешностей аппроксимации функция $\varphi(\xi)$ может не иметь корней (см. рисунок 3). В этом случае принимается, что $\xi^* = \arg \min \varphi(\xi)$.

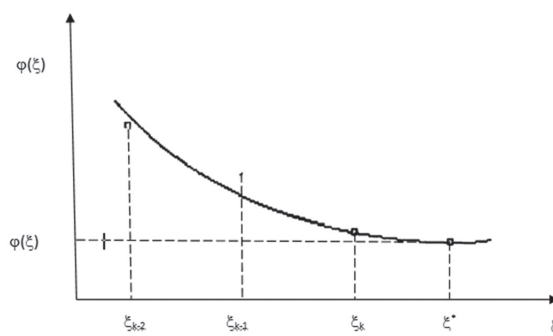


Рис. 3. Прогнозирование экстремального уровня ξ^* в случае отсутствия корней функции $\varphi(\xi)$

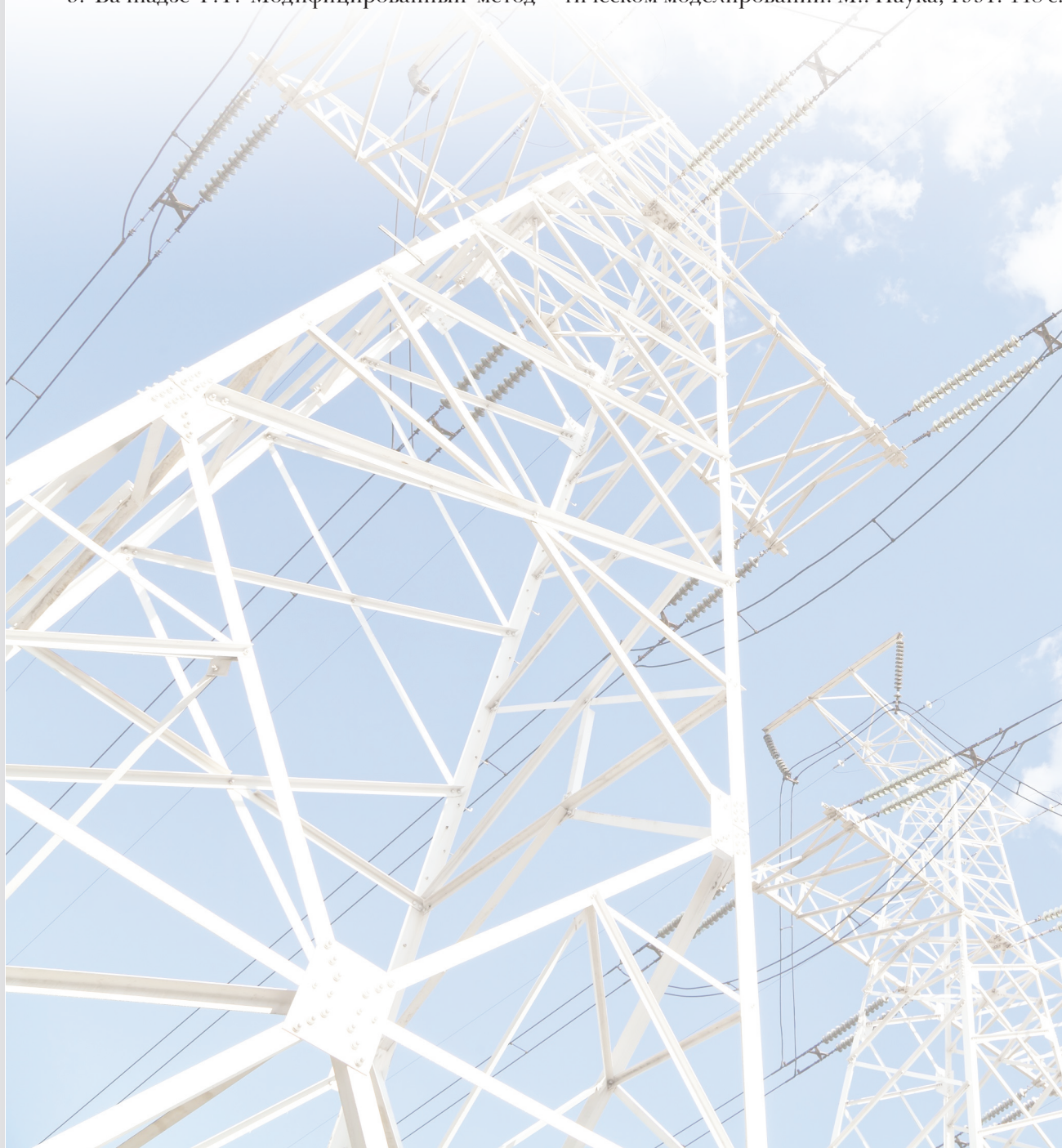
Данный метод оптимизции является основой единого методического подхода [6,7] к совместной оптимизации конструктивно-компоновочных и теплоэлектрических параметров ТЭВ, которая проводится с помощью методики расчета конструктивно-компоновочных параметров

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ТЭВ и модели функционирования ТЭВ в составе ВЛЭП при проведении параметрического синтеза технического облика перспективной ВЛЭП, включающий в свой состав связку «ТЭВ+ВВП».

Литература

1. Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. М.: Наука, 1983.
2. Чичинадзе В.К. Об одном способе использования случайного поиска для определения экстремума функции нескольких переменных. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1967. № 1.
3. Вачнадзе Р.Т. Модифицированный метод ψ - преобразования. Тр. ИСУ АН Груз.ССР. Автоматическое управление, 1973.
4. Чичинадзе В.К., Гадахабадзе И.Г. Об одной модификации метода ψ -преобразования. Сообщ. АН Груз.ССР, 1976, № 1.
5. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. М.: Наука, 1990. 88 с.
6. Галеев Э.В., Тихомиров В.М. Оптимизация: теория, примеры, задачи. М.: Едиториал УРСС, 2000. 320 с.
7. Методы оптимизации в экономико-математическом моделировании. М.: Наука, 1991. 448 с.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-5

ВЫБОР ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ БОРТОВОГО ГЕНЕРАТОРА ХОЛОДНОГО АЗОТА АВТОРЕФРИЖЕРАТОРА*

CHOICE IS THE FUNDAMENTAL STRUCTURAL SCHEME AND MAIN EQUIPMENT OF THE ON-BOARD GENERATOR COLD NITROGEN REFRIGERATOR TRUCK

Виктор Васильевич Редькин

почетный работник науки и техники РФ,
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Олег Вадимович Шабалин

кандидат технических наук
начальник отдела
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Максим Васильевич Кулик

научный сотрудник
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 72-19-11

Андрей Дмитриевич Ермаков

курсант
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 72-19-11

Аннотация

Проведен сопоставительный анализ двух конкурирующих вариантов принципиальной структурной схемы бортового генератора холодного азота (БГХА): 1) с мембранным блоком разделения воздуха; 2) с адсорбционным блоком разделения воздуха. На основании результатов проведенного сопоставительного анализа конкурирующих вариантов принципиальной структурной схемы БГХА по показателям надежности и массо-габаритным (объемным) характеристикам основного оборудования в качестве базового варианта схемы БГХА производительностью 30 нм³/час азота чистотой 95 об.% выбран вариант БГХА с мембранным блоком разделения воздуха и вихревым охладителем продукционного азота.

Выбранный вариант принципиальной структурной схемы бортового генератора холодного азота может быть использован при разработке опытного образца БГХА авторефрижератора для транспортировки плодоовощной продукции в регулируемой газовой среде с содержанием азота до 95 об.% при температуре 0... +3°С.

Ключевые слова: генератор азота, регулируемая газовая среда, мембранный блок разделения воздуха, алюмогелевый осушитель воздуха, вихревой эффект, коэффициент температурной эффективности вихревой трубы.

Summary

A comparative analysis of two competing variants of the concept of the onboard cold nitrogen generator (OCNG) is carried out: 1) with a membrane air separation unit; 2) with an adsorption air separation unit. On the basis of the results of the comparative analysis of competing variants of the OCNG structural scheme in terms of reliability and mass-dimensional (volumetric) characteristics of the main equipment as the basic version of the OCNG scheme with a capacity of 30 Nm³/h of nitrogen with a purity of 95% selected OCNG with the membrane air separation unit and a vortex cooler production of nitrogen.

Selected fundamental structural scheme of the onboard generator cold nitrogen could be used in the development of a prototype OCNG of the refrigerator truck to transport fruits and vegetables in controlled atmosphere with nitrogen content up to about 95% at a temperature of 0...+3°С.

Keyword: nitrogen generator, regulated gas environment, membrane air separation unit, alumogel dehumidifier, vortex effect, coefficient of thermal efficiency of the vortex tube.

* Настоящая статья опубликована в рамках выполнения Договора № 10197ГУ2015 от 08.06.2016 г. по программе «УМНИК».

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Генераторы азота – воздухоразделительные установки, вырабатывающие газообразный азот, широко используются, в том числе, для создания регулируемой газовой среды (РГС) при крупнотоннажном хранении плодоовощной продукции в стационарных холодильных камерах, а также в комплексных холодильниках при хранении охлажденных продуктов в РГС [1, 2]. Согласно данным [3], создание и поддержание регулируемой газовой среды с повышенным содержанием азота в стационарных холодильных камерах позволяет сократить потери плодоовощной продукции в 1,5-2 раза.

В настоящее время производители плодоовощной продукции, для снижения потерь во время длительной транспортировки, активно используют обработку продукции вредными и запрещенными в странах Европы и США смесями воска, парафина и сорбиновой кислоты.

Создание бортового генератора холодного азота для авторефрижераторов и рефрижераторных полуприцепов позволит поддерживать на борту РГС с повышенным содержанием азота и пониженной температурой, что обеспечит сокращение потерь плодоовощной продукции при длительной транспортировке.

Цель настоящей работы – выбор базового варианта принципиальной структурной схемы и основного оборудования бортового генератора холодного азота (БГХА) авторефрижератора для создания и поддержания на борту РГС с повышенным содержанием азота и пониженной температурой.

При выборе базового варианта принципиальной структурной схемы БГХА в качестве конкурирующих вариантов рассматривались:

1) Схема БГХА № 1 (рисунк 1), построенная на основе:

- воздушного компрессора со встроенным осушителем;
- мембранного блока разделения воздуха (МБРВ);
- вихревого аппарата – охладителя производственного азота со встроенным осушителем.

2) Схема № 2 БГХА (рисунк 2), построенная на основе:

- воздушного компрессора с блоком осушки и очистки от CO₂;
- адсорбционного блока разделения воздуха (АБРВ);
- вихревого аппарата – охладителя производственного азота.

Выбор базового варианта принципиальной структурной схемы БГХА на предпроектном этапе проводился по показателям технического уровня мобильных азотных установок периоди-

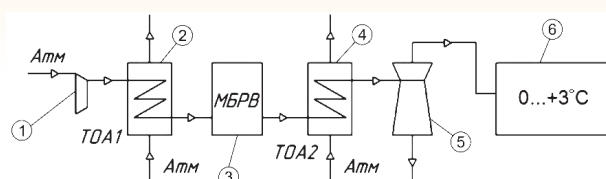


Рис. 1. Схема БГХА с мембранным БРВ (1 – воздушный компрессор со встроенным осушителем, 2, 4 – теплообменник-охладитель сжатого воздуха, 3 – мембранный БРВ, 5 – вихревой аппарат-охладитель производственного азота, 6 – изотермический полуприцеп)

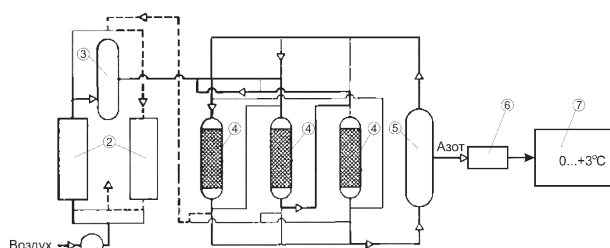


Рис. 2. Схема БГХА с адсорбционным БРВ (1 – воздушный компрессор, 2 – адсорбционный блок осушки и очистки от CO₂, 3, 5 – ресиверы, 4 – адсорберы БРВ, 6 – вихревой аппарат-охладитель производственного азота, 7 – изотермический полуприцеп)

ческого действия, включая:

1. показатели надежности машинного и технологического оборудования;
2. массо-габаритные (объемные) характеристики оборудования;
3. время выхода на рабочий режим (время пуска).

Проведенный сопоставительный анализ конкурирующих вариантов принципиальной структурной схемы БГХА производительностью 30 нм³/час азота чистотой 95 об.%, результаты которого приведены в таблице 1, показал, что:

- 1). Назначенный ресурс мембранного блока разделения воздуха в схеме БГХА № 1 примерно в 4 раза больше, чем у адсорбционного БРВ в схеме № 2;

Таблица 1

Результаты сравнения показателей надежности конкурирующих вариантов принципиальной структурной схемы БГХА на предпроектном этапе

№№ п/п	Вариант схемы БГХА	Показатели надежности	
		Время пуска	Назначенный ресурс БРВ
1	С мембранным БРВ	2...3 мин	180 тыс. час.
2	С адсорбционным БРВ	30 мин *	40 тыс. час.

* – без учета времени на осушку адсорбента после длительного останова БРВ.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2). По объемным характеристикам мембранный БРВ в схеме БГХА № 1 в 3 раза компактнее адсорбционного БРВ в схеме БГХА № 2.

3). Время выхода на рабочий режим ($T_{\text{пуска}}$) БГХА с мембранным БРВ составляет 2...3 мин, что на порядок меньше, чем у БГХА с адсорбционным БРВ.

Учитывая значимость показателей надежности и массо-габаритных (объемных) характеристик при оценке технического уровня мобильных азотных установок периодического действия, в качестве базового варианта принципиальной структурной схемы бортового генератора холодного азота выбран вариант № 1 – БГХА с мембранным БРВ и вихревым охладителем производственного азота.

Основное машинное и технологическое оборудование БГХА, построенного на основе базового варианта принципиальной структурной схемы, выбиралось для БГХА производительностью 30 м³/час азота чистотой 95 об.%. На предпроектном этапе разработки в структурную схему БГХА были включены:

- воздушный компрессор производительностью 36 м³/час при давлении 1,0 МПа;
- блок разделения воздуха типа АМУ (азотная мембранная установка), со следующими характеристиками [4]:

- нормативный срок службы мембранного модуля, часов (лет)	180 000 (20)
- производительность при чистоте азота 95 об.%, м ³ /мин	0,5
- концентрация азота с возможностью регулирования, об.%	90,0...99,9
- давление воздуха на входе, МПа	1,0
- давление азота на выходе, МПа	0,98
- температурный диапазон эксплуатации, С	+5...+45
- доля получаемого азота с концентрацией 95 об.%, от подаваемого в МБРВ воздуха, %	83,5

- вихревой аппарат-охладитель производственного азота со встроенным алюмогелевым осушителем.

Применение данного вихревого аппарата со встроенным осушителем позволяет поддерживать температуру в холодильной камере автофрижидера с точностью до $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в интервале от 0°C до $+3^\circ\text{C}$.

При работе без осушителя эффективность охлаждения с помощью вихревого эффекта снижается на 10...15%, при этом нарушается стабильность работы вихревого аппарата.

Для оценки эффективности вихревого аппарата используют коэффициент температурной

эффективности η_T , [5] который представляет собой отношение получаемого эффекта охлаждения ΔT_x к эффекту охлаждения ΔT_s при изоэнтропийном расширении газа с параметрами p_c и T_c до давления охлажденного потока:

$$\eta_T = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_s} = \frac{\Delta T_x}{T_c [1 - (1/\varepsilon)^{(k-1)/k}]},$$

где $\varepsilon = p/p_x$ – степень расширения газа в вихревой трубе (p_c и p_x – давление сжатого газа и охлажденного потока);

T_c – температура сжатого газа;

k – показатель адиабаты.

С учетом параметров потока азота на входе в вихревую трубу для использования в вихревом аппарате была выбрана вихревая труба фирмы Nex Flow 50015H [6], рассчитанная на давление сжатого потока p_c от 1,4 до 8,4 бар и температуру $T_c = 293\text{ K}$. Результаты расчета разности значений между конечной и начальной температурами холодного и горячего потоков в зависимости от давления p_c и доли холодного потока (μ) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета понижения/повышения температуры потоков азота в зависимости от p_c и μ

Давление, BAR	Поток	Холодная фракция %						
		20	30	40	50	60	70	80
1.4	Холодный воздух	34	33	31	28	24	20	16
	Горячий воздух	8	14	20	28	26	46	59
2.8	Холодный воздух	48	46	42	39	34	28	20
	Горячий воздух	11	18	28	38	50	62	80
4.1	Холодный воздух	57	55	51	46	40	33	25
	Горячий воздух	14	22	33	44	57	73	92
5.5	Холодный воздух	63	62	56	51	45	36	28
	Горячий воздух	14	24	35	47	63	80	100
6.9	Холодный воздух	68	65	61	55	48	39	30
	Горячий воздух	14	25	37	50	66	84	106
8.4	Холодный воздух	72	69	64	58	50	41	31
	Горячий воздух	14	26	38	52	68	86	108

По данным таблицы 2 построены зависимости температур потоков на выходе из вихревой

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

трубы от доли холодного потока μ для $p_c = 7$ бар и $T_c = 303$ K, представлены на рисунке 3.

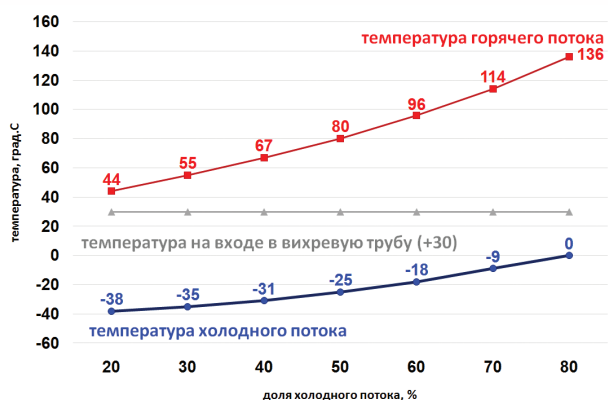


Рис. 3. Зависимость температуры потоков на выходе из вихревой трубы от доли холодного потока (при температуре на входе $+300\text{C}$), $P_{\text{ex}} = 0,7$ МПа

Режимные параметры и характеристики выбранного основного технологического и компрессорного оборудования БГХА могут быть использованы при разработке опытного образца БГХА авторефрижератора для транспортировки плодоовощной продукции в регулируемой газовой среде с содержанием азота до 95 об.% при температуре $0...+3^{\circ}\text{C}$.

Заключение

На основании проведенного сопоставительного анализа конкурирующих вариантов принципиальной структурной схемы БГХА по показателям надежности и массо-габаритным (объемным) характеристикам основного оборудования в качестве базового варианта схемы БГХА производительностью 30 $\text{nm}^3/\text{час}$ азота чистотой 95 об.% выбран вариант БГХА с мембранным блоком разделения воздуха и вихревым охладителем производственного азота.

Выбранный вариант принципиальной структурной схемы бортового генератора холодного азота может быть использован при разработке опытного образца БГХА авторефрижератора для транспортировки плодоовощной продукции в регулируемой газовой среде с содержанием азота до 95 об.% при температуре $0...+3^{\circ}\text{C}$.

Литература

1. Архаров А.М. и др. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур» и «Холодильная криогенная техника и кондиционирование»: В 2 т. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.
2. Бондаренко В.Л., Лосяков Н.П., Симоненко Ю.М., Чулкин А.П., Кузьменко И.Ф., Талакин О.Г. Применение мембранных процессов в технологиях разделения газовых смесей на основе компонентов воздуха // Технические газы, 2012. № 2. С. 19-30.
3. Е.Ф. Балан, И.Г. Чумак, В.Г. Картофяну, Э.Ж. Иукурдидзе Динамика потерь плодоовощной продукции по этапам непрерывной холодильно-транспортной цепи (НХТЦ). Интернет-газета «Холодильщик» <http://www.holodilshchik.ru/>.
4. ООО «Тегас». Номенклатурный ряд азотных мембранных установок.
5. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
6. ООО «Вортекс». Каталог продукции. Вихревые трубы Nex Flow.

УДК.521.396.677.49

АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С ЛИНЕЙНЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ БОЛЬШЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

ANTENNA GRILLES WITH LINEAR DIMENSIONS OF THE ELEMENTS ARE LARGER WAVELENGTH

Сергей Прокофьевич Присяжнюк

доктор технических наук, профессор
генеральный директор
ЗАО «Институт телекоммуникаций»
Адрес: 194100, Санкт-Петербург,
ул. Кантемировская, д. 5
Тел.:+7 (812) 740-77-07

Андрей Сергеевич Присяжнюк

кандидат технических наук
исполнительный директор
ЗАО «Институт телекоммуникаций»
Адрес: 194100, Санкт-Петербург,
ул. Кантемировская, д. 5
Тел.:+7 (812) 740-77-07

Борис Иосифович Суховецкий

кандидат технических наук
советник генерального директора
ЗАО «Институт телекоммуникаций»
Адрес: 194100, Санкт-Петербург,
ул. Кантемировская, д. 5
Тел.:+7 (812) 740-77-07

Аннотация

Показано, что перспективным улучшением фазированных антенных решеток представляется использование более высоких мод мультипольного излучения на элементах антенной решетки с линейными размерами больше длины волны. Данный подход позволит существенно повысить эффективность информационного обмена в радиосетях.

Ключевые слова: антенна, мультиполь, квадруполь, многомодовый излучатель, суббрунор, динамическое амплитудно-фазовое распределение, сверхширокополосная фазированная антенная решетка.

Summary

It is shown that a promising improvement of phased antenna arrays is the use of higher modes of multipole radiation on antenna array elements with linear dimensions larger than the wavelength. This approach will significantly improve the efficiency of information exchange in radio networks.

Keywords: antenna, multipole, quadrupole, multimode radiator, sub-amplifier, dynamic amplitude-phase distribution, ultra-wideband phased array antenna.

Представление в антенной решетке излучаемого поля в виде суперпозиции полей отдельных мультиполей плодотворно в задачах исследования излучений сложных источников в сетях радиосвязи [1-3].

Элементарным источником излучения электромагнитных волн считается диполь, представляющий собой два связанных разнополярных заряда, разнесенных в пространстве. В случае синусоидальных волн обычно рассматривают только дипольное излучение, и практически всегда пренебрегают более высокими модами. В настоящее время все большее значение приобретают более высокие моды, поскольку их мож-

но использовать для усиления или подавления пространственного излучения, а также формирования нужного амплитуднофазового распределения на раскрыве антенны, то есть управлять угловым спектром, а значит формой и крутизной диаграммы направленности (ДН), а также ее ориентацией в пространстве [3]. Существуют две ортогональные моды дипольного излучения горизонтальной и вертикальной поляризации, в принципе обе моды можно использовать для передачи независимых сигналов. Однако практически это не удастся сделать, поскольку из-за неустойчивого положения вектора поляризации дипольных мод (вращения вектора поляриза-

ции) возникают перекрестные помехи. Комбинация из двух диполей создает квадрупольное излучение [13]. Три возможные комбинации ортогональных мод в виде квадруполей представлены на *рисунке 1*.

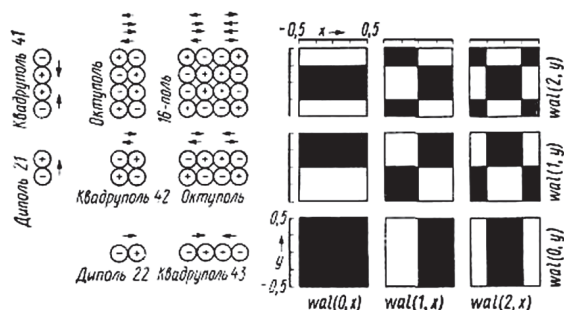


Рис. 1. Различные виды диполей и квадруполей (слева). Квадруполь 41 можно реализовать при помощи двух диполей 21, квадруполь 43 – при помощи двух диполей 22, а квадруполь 42 – при помощи двух диполей 22 или двух диполей 21

Легко видеть, что эти более высокие моды мультипульного излучения можно расположить (ориентировать в пространстве направляющих косинусов) так, что возникают изоморфизмы с двумерными функциями, что, в свое время, явилось основанием (подсказкой) для введения понятия «функций Уолша».

Общее правило формирования (существования) высших распространяющихся мод следующее: скалярное поле допускает униполярную и более высокие моды излучения, векторное поле – дипольное излучение и более высокие моды, а тензорное поле – квадрупольное излучение и более высокие моды [4].

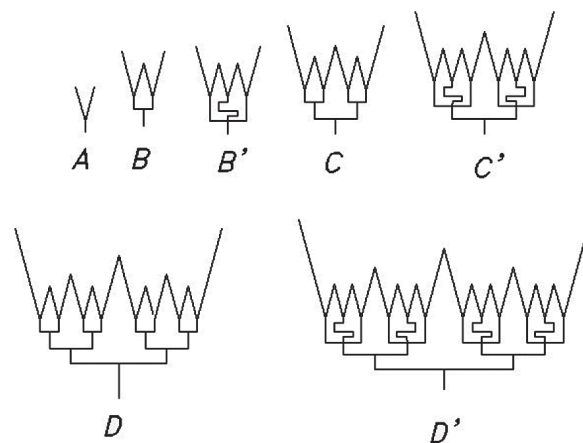
Представляет интерес рассмотреть механизм формирования излучения решетчатыми структурами, возбуждаемыми высшими распространяющимися модами H_{i0} , ($i=1,2,3,..5$ – простые числа), посредством которых возможно создание динамического амплитудно-фазового распределения (ДАФР) на (раскрытии) апертуре антенной системы. Подобные многомодовые структуры, созданные на базе плоских рупоров образуют класс субрупоров порядка (уровня) $M = 0,1,2,..n$ по основанию $K=2,3,..$ – числа натурального ряда.

Такие конструкции включают в себя практически все возможные варианты гибридных устройств с распространяющимися высшими модами и обладают не только динамическим амплитуднофазовым распределением, но практически неограниченной полосой пропускания, и линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ) в указанной полосе частот [2, 6, 8].

Апертура антенной системы, образованная су-

брупором уровня « M », в общем случае представляет собой пространственный фильтр, с управляемым угловым (пространственным) спектром. Особый интерес представляют конструкции из пары субрупоров, когда последние располагаются в ортогональных плоскостях и конструктивно встраиваются друг в друга [3]. Такие структуры позволяют довольно просто решать как вопросы поляризации, и «развязки» излучающих элементов [11], так и создание излучающих элементов (с «нулевой» пространственной протяженностью) и односторонней направленностью *рисунок 9*.

Субрупор порядка (уровня) « M » – это структура из набора однотипных элементов (субрупоров нулевого уровня $M=0$, *рисунок 2*), которые позволяют конструировать практически все возможные виды гибридных устройств с высшими распространяющимися модами и динамическим амплитуднофазовым распределением на раскрытии антенны. Подобные структуры посредством последовательно-параллельного наращивания размера апертуры излучающей системы образуют плоскую пространственно-протяженную конструкцию, которая совмещает в себе системы излучения и возбуждения (симбиоз). Такую структуру можно интерпретировать как направляющая система (пространственный фильтр), поперечные размеры которой определяют граничные условия для высших распространяющихся мод.



A – стандартный плоский рупор (субрупор нулевого уровня $m=0$), B, B' – субрупор первого уровня (порядка) $m=1$ по основанию $k=2,3$, C, C' – субрупор второго уровня (порядка) $m=2$ по основанию $k=2,3$, D, D' – субрупор третьего уровня (порядка) $m=3$ по основанию $k=2,3$.

Рис. 2. Субрупор уровня (порядка) $M=0,1,2,3,..n$ по основанию $k=2,3,..$ (сверхширокополосный, многоуровневый излучатель, многомодовый элемент, «свернутый рупор», «Fold Horn», (FH))

Это позволяет довольно просто (на уровне СВЧ полей на апертуре элементов (излуча-

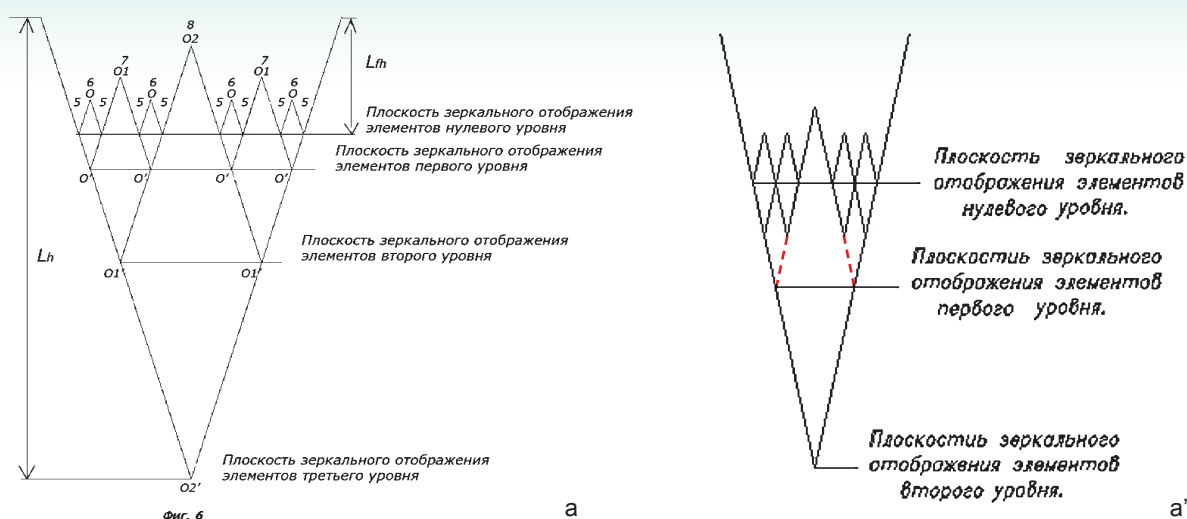


Рис.3. Иерархия построения многоуровневого излучающего раскрыва (апертуры антенной системы), образованного из (субрупоров уровня M по основанию $K=2,3$) многомодовых излучателей типа «свернутый рупор», «Fold Horn», (FH).

телей), а не аппаратурных устройств) реализовать эффективное регулирование углового (пространственного) спектра. Такая конструкция обеспечивает относительно высокий коэффициент усиления, требуемую линейность ФЧХ в широкой полосе частот и довольно просто решает вопросы «развязки входов», согласования и взаимного влияния в требуемой полосе частот. Все это позволяет создавать универсальные компактные сверхширокополосные антенные системы (АС), способные решать задачи одновременного приема и передачи узкополосных и широкополосных сигналов, относящихся к функционально различным, работающим в различных частотных диапазонах подсистемам, т.е. позволяет реализовать независимое функционирование нескольких информационных каналов на одну АС. При этом значительно уменьшается взаимное влияние соседних каналов и повышается качество и скорость передаваемой информации.

Иерархия построения структуры субрупоров уровня $M=3$ по основанию $K=2$ и уровня $M=2$ по основанию $K=3$ представлены на рисунках 3 а, а'.

Такие конструкции характеризуется не только повышенной полосой пропускания, линейной ФЧХ, динамическим амплитуднофазовым распределением, но и коэффициентом пространственного укорочения (сжатия): $K_c=L_H/L_{FH}$, где L_H протяженность исходного рупора с размером апертуры $a3$, а L_{FH} – протяженность свернутого рупора, представляющего собой субрупор третьего уровня $M=3$ с таким же размером апертуры. Пространственно протяжен-

ный рупор L_H является (громоздким), узкополосным и имеет только одну точку входа (возбуждения) $O2'$, свернутый рупор характеризуется пространственной протяженностью L_{FH} количеством точек управления $n=2,3$ для рисунка 2В,В' и $n=8,12$ для рисунка 2D,D'. Амплитуднофазовое распределение (АФР) на апертуре рупора L_H является однородным неуправляемым, а АФР на апертуре субрупора порядка $M \neq 0$ является динамическим, легко управляемым по любой из точек входа.

Представим структуру поля субрупора уровня M . Допустим, что устройства, представленные на рисунке 4 идеально согласованы для структур поля 1',1'',2',2''. Тогда эти конструкции идеально согласованы и для подаваемых на вход системы волн 1,2. Значит, субрупор уровня M представляет собой пространственно протяженную решетчатую структуру (направляющую систему), поперечный размер которой больше длины волны ($a \geq \lambda$), с несколькими независимыми входами. Наличие пространственной протяженности позволяет получить требуемый фазовый набег между распространяющимися модами H_{10} , H_{20} , а несколько входов – организовать регулирование отношения их амплитуд

$$\begin{aligned} \psi_{12} &= (\text{фаза } H_{10} - \text{фаза } H_{20}), \\ V &= A_{m1} H_{20} / A_{m2} H_{10}. \end{aligned}$$

Значит, амплитуднофазовое распределение на апертуре (раскрыве) такого устройства является динамическим (ДАФР). Пространственная ориентация (положение) диаграммы направленности (ДН), формируемой такой апертурой является управляемым, и в качестве параметра управления выступает отношение амплитуд рас-

пространяющихся мод

$$V = AmH_{20} / AmH_{10}$$

Как следует из рисунков 4 а, б при равноамплитудном возбуждении апертуры модами H_{10} , H_{20} результирующее распределение на раскрыве является симметричным относительно центра, а при неравноамплитудном – смещенным (несимметричным), причем величина этого смещения зависит от соотношения амплитуд этих мод (рисунки 4 в, г).

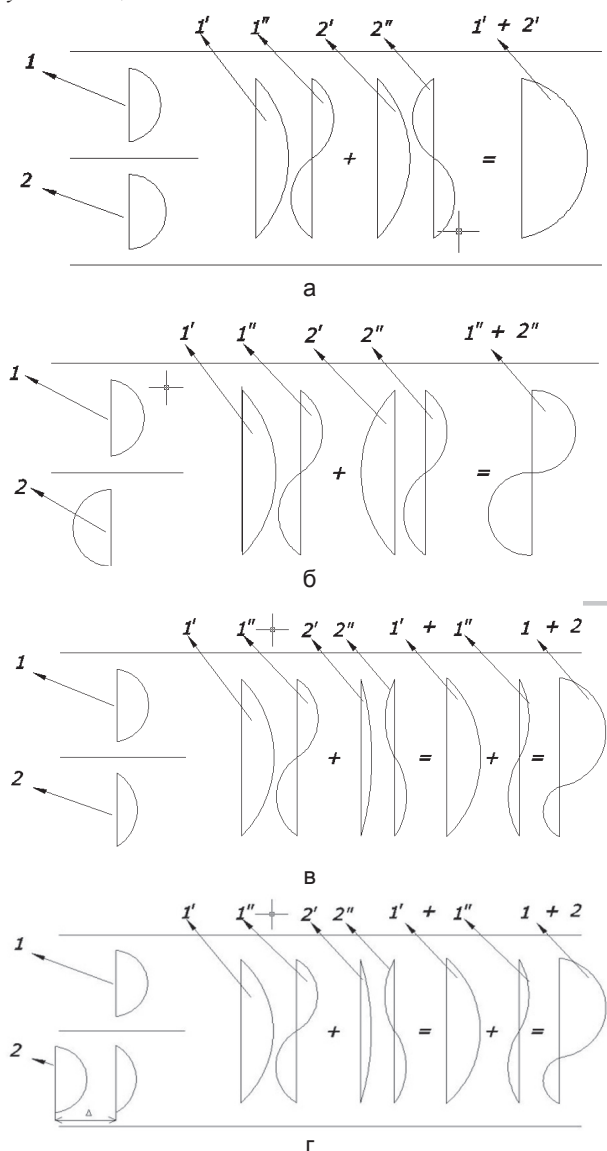


Рис. 4. Субгрупп уровня $M=1$, $K=2$:

- а – равноамплитудное синфазное возбуждение
- б – равноамплитудное противофазное возбуждение
- в – неравноамплитудное синфазное возбуждение
- г – равноамплитудное несинфазное возбуждение с задержкой

Формирования ДАФР посредством мод H_{10} , H_{20} .

На рисунках 5 а, б представлены ДН субгруппо-

ра $M=1$ по основанию $K=2$ и оптимальное отношение амплитуд мод $\beta = AmH_{20} / AmH_{10}$, $a/\lambda = 1.2$, $\psi_{12} = 0.5\pi$, $\beta = 0, 0.5, 1, 2$.

Максимумы ДН элемента имеют направления $u=0, 0.5, 1, 2$, что соответствует угловой координате $\theta = 0, 7, 15, 36$ градусов, а это значит, что посредством перераспределения мощности между распространяющимися модами (изменение отношения амплитуд мод, β) можно очень эффективно управлять положением максимума ДН одиночного (изолированного) элемента в пространстве [7].

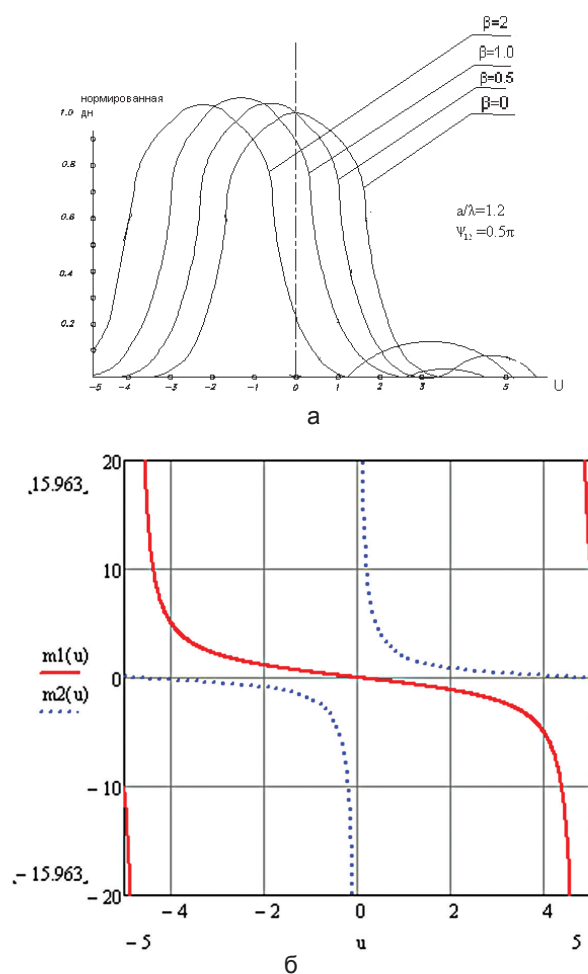


Рис. 5. а – динамическая ДН элемента (излучателя) при β -var,

б – оптимальное отношение амплитуд мод $\beta = AmH_{20} / AmH_{10}$, обеспечивающее сканирование ДН элемента.

Рисунок 6 поясняет механизм сканирования луча ФАР и формирования сектора обзора (диаграммы сканирования – ДС) [5] при размерах элемента ФАР больше длины волны ($a > \lambda$).

В такой ФАР сканирование луча [7] реализуется не стандартным способом, а посредством одинакового и одновременного (синхронного) изменения разности фаз между сигналами воз-

буждения каждого из элементов, формирующих апертуру АР, а это приводит к изменению ориентации луча (сканированию) в пространстве.

При таком способе управления лучом не требуется «ждать», когда будет сформировано АФР на всей апертуре АР, а это значительно повышает скорость сканирования луча. Кроме этого, подобный способ качания луча позволяет реализовать электрическое управление равносигнальным направлением, т.е. пеленгование целей в режиме обзора.

Подобные антенные элементы являются уникальными по своим свойствам, поскольку позволяют не только довольно просто управлять угловым (пространственным) спектром (сканировать ДН одиночного элемента), но и решать задачи согласования, «развязки входов», взаимного влияния и др. не стандартными (аппаратными способами), а на уровне регулирования взаимодействия полей СВЧ на апертуре элементов.

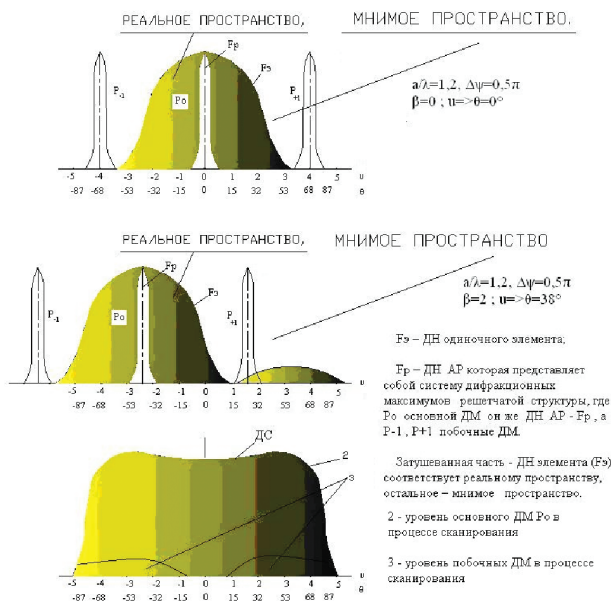


Рис. 6. Сканирование луча АР и механизм формирования сектора обзора (ДС) при размерах излучающего элемента АР больше длины волны ($a > \lambda$).

В случае возбуждения апертуры *субрупора уровня* $M = 1$ с основанием $K = 3$ только нечетными модами H_{10}, H_{30} (рисунком 7), распределение на раскрытие всегда является симметричным, механизм регулирования отношением амплитуд мод отсутствует, амплитуднофазовое распределение на апертуре элемента является статическим, наличие высшей моды способствует дополнительному обуживанию ширины ДН и увеличению ее крутизны спада. Линейный размер апертуры такого элемента всегда ($a \geq \lambda 1.5$). Для АР, сконструированной на

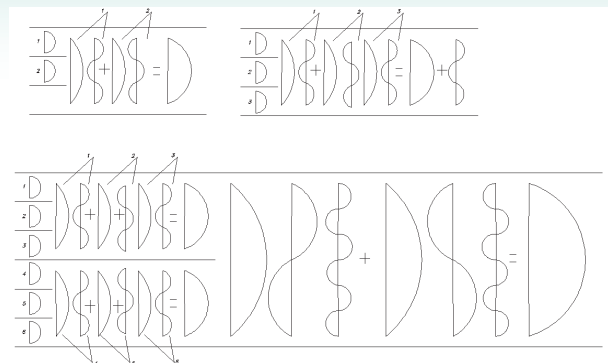
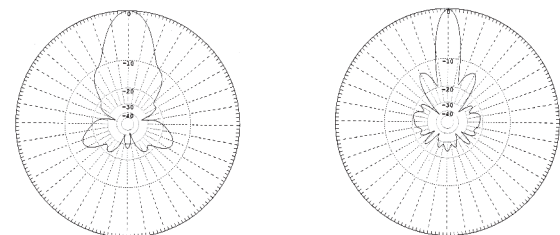


Рис. 7. Формирования ДАФР посредством только нечетных мод H_{10}, H_{30}

базе таких элементов, характерно наличие побочных дифракционных максимумов (ДМ).

Уровень подавления побочных ДМ определяется порядком (уровнем) субрупора. При $M = 1$ и $K = 3$ подавление побочных дифракционных максимумов (ДМ) является слабым, а при $M = 2, 3$ все высшие моды на апертуре полностью подавлены и сохраняется только мода H_{10} , при этом размер апертуры элемента увеличивается в 2, 4 раза, направленность ДН и крутизна ее спадов резко возрастают, что очень наглядно иллюстрируют рисунки 8, 9. Описанный подход позволяет довольно просто решить проблему «сверхнаправленности», когда антенная система формирует сверхузкую ДН при сохранении требуемой полосы пропускания.

В такой конструкции граничные условия могут быть заданы так, что в стационарном (установившемся) режиме (при синфазном возбуждении) будет существовать только мода H_{10} . При этом линейные размеры апертуры субрупора уровня M должны иметь линейные размеры в несколько длин волн ($a > 2\lambda N$), а побочные ДМ полностью подавлены



а : 9.54 dBi = 0 dB (Н поляризация)
 Gh : 7.29 dBd
 P/B : 12.29 dB; Тыл: Азим. 120 гр., Элевация 60 гр
 F : 3000.000 МГц
 Z : 164.655 + j11.453 Ом
 КСВ : 1.3 (50.0 Ом)
 Elev. гр.: 8.3 гр. (Свободное пространство)

б : 12.89 dBi = 0 dB (Н поляризация)
 Gh : 10.74 dBd
 P/B : 10.30 dB; Тыл: Азим. 120 гр., Элевация
 F : 3000.000 МГц
 Z : 120.107 + j15.990 Ом
 КСВ : 1.3 (50.0 Ом)
 Elev. гр.: 14.9 гр. (Свободное пространство)

Рис. 8: а – субрупор $M = 1$ мод возбуждения $H_{10}, H_{30}, H_{10}, H_{30}, H_{60}$; б – субрупор $M = 1$ моды возбуждения.

Из процедуры построения решетчатых структур на базе субрупоров порядка « M » следует (рисунки 2,3,4), что субрупор любого уровня (порядка), кроме нулевого, построены по однотип-

ным схемам, механизм формирования структуры поля на апертуре субрупора любого уровня совершенно одинаков, а отличаются они только граничными условиями. Причем, суть отличия граничных условий заключается в том, что изменяются пределы интегрирования, характе-

ризующие размер апертуры (раскрыв), а значит и функция амплитуднофазового распределения (АФР) на раскрыве, что диктует условие обязательного учета следующей распространяющейся моды более высокого порядка. А это значит, что предложенный способ конструирования сверхширокополосных антенн [6] строго подчиняется теории многоуровневых иерархических систем с вложенными процессами [1].

Из [2, 3] и рисунка 4 следует, что предложенная сверхширокополосная решетчатая структура (направляющая система, многомодовый элемент, «свернутый рупор», «Fold Horn» (FH)), субрупор уровня M) является эффективным излучателем обладает совершенно новыми уникальными свойствами, (которые не свойственны известным излучателям) и обусловлены ее конструкцией:

- в раскрыве искусственно создан набор разрывов непрерывности, которые не зависят от частоты, что способствует увеличению мощности излучения и расширению полосы пропускания;

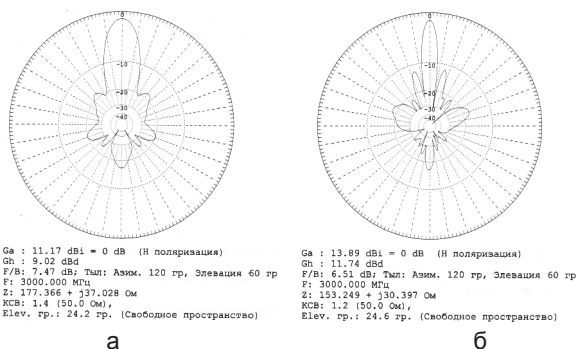


Рис. 9: а – субрупор $M=1$ моды возбуждения H_{10}, H_{50}
 б – субрупор $M=2$ моды возбуждения H_{10}, H_{50}, H_{100}

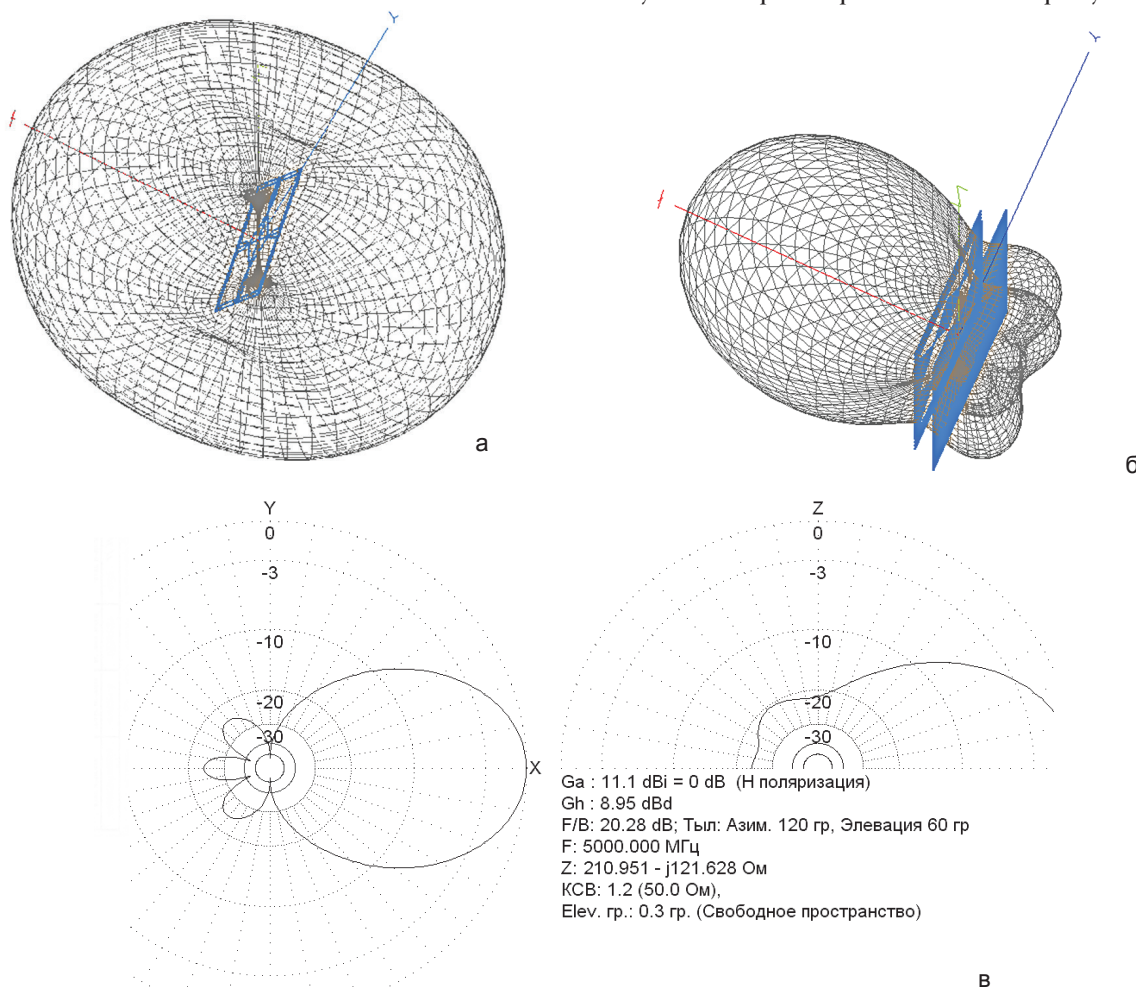


Рис. 10: а, б – пространственные ДН всенаправленной и направленной антенны;
 в – плоские сечения ДН направленной антенны (б) в плоскости азимута и угла места (антенные элементы с укороченной («нулевой») пространственной протяженностью).

● в апертуре (с учетом граничных условий) можно возбудить поле структуры волны любого из распространяющихся типов волн (мод) или их суперпозицию с нужными (управляемыми) амплитудами и фазами, что обеспечивает требуемую ориентацию углового спектра (сканирование):

● система излучения является многоуровневой, элементы любого уровня (кроме нулевого) построены по одинаковой схеме. Механизм формирования структуры поля в апертуре элементов всех уровней совершенно одинаков, а отличаются они только граничными условиями. Значит, структура построения таких АС строго подчиняется принципу иерархических систем с вложенными процессами;

● период функции возбуждения амплитудно-фазового распределения (АФР) и линейные размеры исходных рупоров и излучающего раскрыва подчиняются принципу подобия, т.е. АС характеризуется пространственно-частотной (временной) периодичностью, причем время выступает не только в качестве функционального параметра, но также и в качестве параметра хронологического упорядочивания [9];

● верхняя частота ограничивается только свойствами узла возбуждения (его конструкцией), а нижняя – эффективным линейным размером излучающего раскрыва, который является пространственно протяженным и многоуровневым;

● по способу возбуждения она может быть отнесена к дискретным структурам, а по способу формирования амплитудно-фазового распределения (АФР) к непрерывным системам.

Подобные структуры (антенные излучатели) являются уникальными по своим свойствам. Они позволяют разработать и предложить совершенно новый способ сверхбыстрого электрического качания луча [6] и пеленгования целей (в режиме обзора), а значит создавать ФАР со сверхбыстрым и широкоугольным сканированием [7, 8, 14] по сравнению с ныне существующими. Создавать плоские АР (взамен параболических) с большим размером апертуры при ограниченном (небольшом) количестве элементов, при этом размеры элементов (излучателей) могут быть не только больше длины волны, но даже равны нескольким длинам волн [11].

Из проведенного анализа и сделанных обобщений [14] становится очевидным, что использование представления излучающего системой поля в виде суперпозиции полей отдельных мультиполей плодотворно не только в решении прямых задачах исследования поля излучения сложных источников, но и в решении задач синтеза таких источников. Субрупор уровня (порядка) «М» как раз и является примером

такой удачной конструкции источников мультипольного излучения.

В заключение необходимо отметить, что на базе субрупоров порядка «М» появляется возможность создания компактных высокоэффективных сверхширокополосных антенных систем для базовых наземных станций сети радиосвязи различного назначения [18].

Литература

1. Гончаревский В.С., Присяжнюк С.П. Автоматизированные системы управления войсками. СПб: ВИКУ, 1999. 370 с.
2. Присяжнюк С.П., Суховецкий Б.И. Антенные системы повышенной эффективности // Информация и Космос, 2017. № 3. С. 88-94.
- 3.. Суховецкий Б.И. Сверхширокополосная антенная решетка. Патент РФ № 2484563 опубликован 10.06.2013 г. Бюллетень № 16.
4. Сканирующие антенные системы СВЧ / Под ред. Маркова Г.Т., Чаплина А.Ф. Т 1,2,3. М.: Сов. радио, 1966. 1969, 1971.
5. Суховецкий Б.И. Способ электрического качания луча. Патент РФ № 2480871 опубликован 27.04.2013. Бюллетень № 12.
6. Суховецкий Б.И. Способ создания сверхширокополосных антенных систем ЗАЯВКА № 2013106921 приоритет 11.02.2013 г.
7. Суховецкая С.Б. Сверхширокополосная сканирующая ФАР. Заявка № 2013116543 приоритет от 13.03.2013г. решение ФИПС о выдаче патента от 7.10.2014г Патент РФ № 2540792 опубликован 10.02.2015 г. Бюл.№ 4.
8. Суховецкий Б.И. Способ изготовления сверхширокополосных антенных систем с управляемой ДН. Заявка № 2013106920 приоритет 11.02.13, решение ФИПС о выдаче патента от 7.02.2015г. Патент РФ №2552232 опубликован 10.06.2015 г. Бюл.№16.
9. Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 240 с.
10. Двайт Г.Б. Таблица интегралов М. Наука, 1973. 226с.
11. Суховецкий Б.И. Сверхширокополосные антенные решетки с элементами, линейные размеры которых больше длины волны // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 2011. № 2. С.50-61.
- 12.Суховецкий Б.И. Перспективы развития ФАР // Информация и космос, 2013. №1. С.81-92.
13. Хармут Х. Теория секвентного анализа (основы применения). М.: Мир, 1980. 574 с.
14. Суховецкий Б.И. К парадоксу усиления Наннапа, обобщения и выводы. Новый способ сканирования луча в ФАР с размерами элементов больше длины волны // Вестник Петровской Академии, 2015, № 1(38). С.3-33.
15. Суховецкий Б.И., Суховецкая С.Б. Широкополосная антенна, патент РФ №2052878 с приоритетом 1.04.1993.
16. Суховецкий Б.И., Суховецкая С.Б. Широкополосная антенная решетка, Патент РФ2052877 с приоритетом 1.04. 1993г.
17. Кюн Р. Микроволновые антенны. М.: Судостроение, 1967. С. 184-190.
18. Цымбал В.А., Васильченко А.А., Кочеров А.В. Математическое моделирование процесса установления соединения в сети сотовой связи GSM // Известия Института инженерной физики, 2015. №3(37). С. 16-22.

УДК 621.396

МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ УЗЛА СЕТИ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА НА ОСНОВЕ НЕМАРКОВСКИХ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ С «РАЗОГРЕВОМ»

OPERATING MODEL RE- CONFIGURATION OF A NETWORK NODE OF AN INFORMATION EXCHANGE SYSTEM BASED ON NON-MARKOV QUEUING SYSTEMS WITH «STARTER»

Кирилл Юрьевич Цветков

доктор технических наук, профессор
начальник кафедры сетей и систем
связи космических комплексов
Военно-космическая академия
имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
Ждановская наб., д. 13
Тел.: +7 (911) 947-19-58
E-mail: wavelet3@yandex.ru

Михаил Николаевич Квасов

адъюнкт
Военно-космическая академия
имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
Ждановская наб., д. 13
Тел.: +7 (812) 237-12-49

Аннотация

В работе на основе модели системы обслуживания с «разогревом» исследуется влияние задержки подключения резерва на качество обслуживания информационных потоков и, как следствие, на связность и устойчивость системы информационного обмена. Решается задача обоснования требований к оперативности подключения резервного канала и его пропускной способности для обеспечения требуемого качества обслуживания при различных значениях длительности «разогрева» и уровня нагрузки системы.

Ключевые слова: устойчивость, спутниковые системы связи, реконфигурация сети, система обслуживания с «разогревом».

Summary

In the work on the basis of the service system model with "starter" the influence of reserve connection delay on the quality of information flows service and, as a consequence, on the connectivity and stability of the information exchange system is investigated. The problem of substantiating the requirements for the promptness of the backup channel connection and its bandwidth to ensure the required quality of service at different values of the heating duration and the system load level is solved.

Keywords: stability, satellite communication systems, network reconfiguration, service system with «starter».

Одним из важнейших свойств системы информационного обмена (СИО) является устойчивость. Устойчивость СИО зависит от коэффициента готовности и связности СИО [1]. В свою очередь связность СИО помимо чисто топологических факторов зависит от качества обслуживания информационных потоков в информационных направлениях связи и вероятных деструктивных воздействий.

Потенциально в нормальных условиях экс-

плуатации СИО удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям по устойчивости. При этом резервирование наземных каналов связи осуществляется за счет спутниковых каналов и направлений связи. Время включения резервного спутникового канала в значительной мере влияет на качество обслуживания передаваемых по сети потоков информации и, как следствие, на связность и устойчивость СИО. Способы снижения временных издержек при маршрутизации

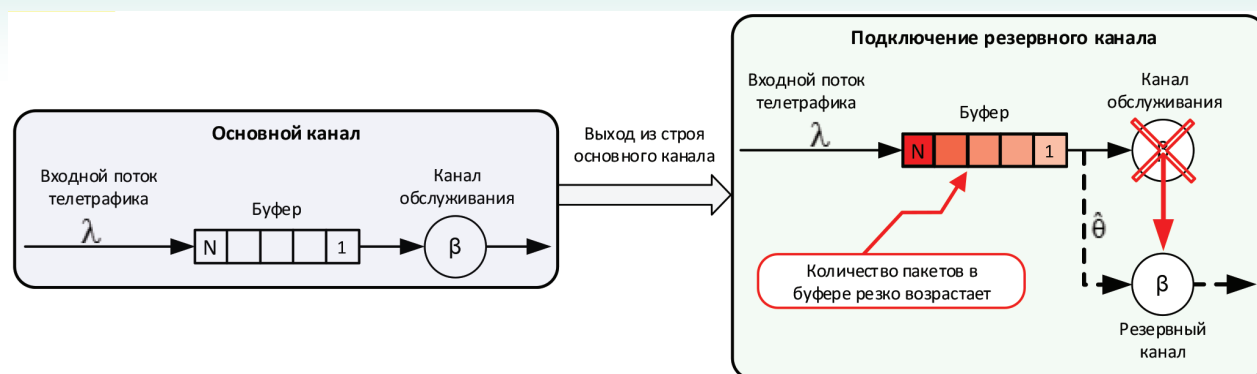


Рис.1. Модель оперативной реконфигурации узла сети СИО

информационных потоков рассматривались в работах [2, 3].

Вопросы перераспределения и резервирования ресурсов сетей информационного обмена рассматривались в работах Новикова Е.А. [4-7], Макаренко С.И. [4], Зиннурова С.Х. [6, 7, 9], Павлова А.Р. [6], Цветкова К.Ю., Родионова А.В., Акмолова А.Ф. [8], Топоркова И.С., Ковальского А.А. [9]. В отличие от перечисленных работ, в статье учитывается дополнительная задержка, возникающая вследствие «разогрева» резервного канала.

При выходе из строя основного канала на узле коммутации включается резервный спутниковый канал обслуживания (возможно, с отличающимися характеристиками). Однако, вследствие необходимости настройки, синхронизации и т.п., резервный канал включается не мгновенно, а через некоторое (случайное) время после так называемого «разогрева». После переключения на резервный канал, начинается восстановление основного канала, которое продолжается некоторое случайное время. Обратное переключение на основной канал также происходит не мгновенно, а с временными затратами на «разогрев».

Известные в теории массового обслуживания модели таких систем, как правило, опираются на предположение об экспоненциальном распределении интервалов времени между поступающими сообщениями, времени обслуживания сообщения в канале и времени «разогрева». Такое представление об исследуемом процессе не является точным. Формирование уточненного представления об исследуемом процессе предполагает введение ограничений на интервал значений, в котором возможно появление случайной величины. В предлагаемой модели время обслуживания в канале и время «разогрева» принимаются распределенными по закону общего вида.

Ключевым вопросом исследования разрабо-

танной модели является получение оценки среднего времени ожидания в системе с учетом времени «разогрева». Для получения оценки этого параметра потребовалось решить задачу преобразования Лапласа-Стилтьеса для функции распределения величины дополнительной задержки, связанной с учетом времени «разогрева».

Формальное описание модели оперативной реконфигурации узла сети СИО представлено на рисунке 1.

В качестве модели входного потока сообщений полагается простейший поток с интенсивностью λ , а длительность обслуживания (передачи) сообщения полагается величиной случайной с законом распределения $B(t)$ и средним значением:

$$\bar{b} = \bar{L}_C / C_k \quad (1)$$

где \bar{L}_C – средняя длина сообщения; C_k – пропускная способность канала.

Сообщения, поступающие в мультиплексор земной станции (ЗС), накапливаются в буфере и передаются по основному каналу (при его исправности). В случае неисправности основного канала сообщения передаются по резервному каналу (после его «разогрева»). При переполнении буфера часть «устаревших» сообщений сбрасывается, чтобы освободить место для вновь поступающих сообщений. Полагается, что задача восстановления и повторной передачи потерянных сообщений решается протоколами верхних уровней. Однако следует отметить, что предельная задержка и допустимая доля потерь сообщений при передаче различных видов информации (речь, данные, видео) регламентируется документами Международного союза электросвязи [10]. Требования к предельным задержкам при передаче сообщений речевого трафика представлены на рисунке 2.

При исследовании общей задержки сообщений в буфере ЗС можно выделить две случайные составляющие. Первая из них обусловлена случайной задержкой при предоставлении ЗС сво-

бодного радиоканала (при отсутствии такового в момент поступления сообщения в буфер источника).

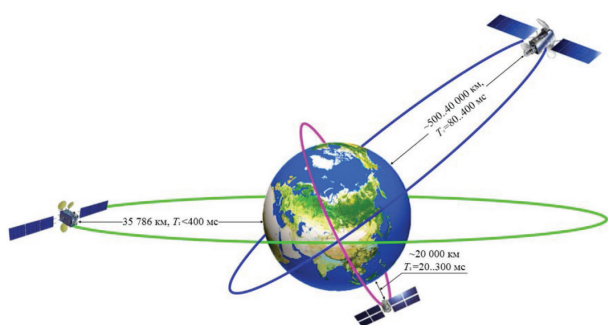


Рис. 2. Предельная задержка при передаче сообщений речевого трафика

При выходе из строя основного канала ЗС ожидает в течение некоторого случайного времени $\hat{\theta}$ до тех пор, пока ей не будет предоставлен резервный канал. Вторая составляющая задержки $\hat{\omega}$ связана с процессом передачи сообщений по резервному каналу и обусловлена случайным характером потока сообщений и конечной скоростью передачи по каналу, а также степенью наполненности буфера к моменту предоставления канала. Вторую составляющую общей задержки $\hat{\omega}$ можно интерпретировать как случайное время ожидания в стандартной одноканальной СМО вида $M/G/1$.

Для СМО с «разогревом» случайная величина времени ожидания может быть представлена в виде суммы двух независимых случайных величин: случайной величины времени ожидания $\hat{\omega}$ в обычной СМО вида $M/G/1$ (без «разогрева») и случайной величины дополнительной задержки \hat{d} , закон распределения которой может быть задан преобразованием Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) функции распределения [11]:

$$D(s) = \frac{\lambda + \theta(s)(s - \lambda)}{s(1 + \lambda\bar{\theta}^1)} \quad (2)$$

где $\theta(s)$ – ПЛС распределения длительности периода разогрева;

$\bar{\theta}^1$ – первый начальный момент распределения случайной длительности разогрева.

Для искомых законов распределения в статье используется метод аппроксимации распределений по начальным моментам [12]. С помощью дифференцирования в нуле ПЛС $f(s)$ функции распределения $F(t)$ некоторой случайной величины можно вычислить начальные моменты распределения:

$$\bar{f}^k = (-1)^k \frac{d^k}{ds^k} f(s) \Big|_{s=0}. \quad (3)$$

Так, применение указанного приема к выра-

жению (2) позволяет определить начальные моменты распределения времени дополнительной задержки в буфере ЗС вследствие «разогрева» резервного канала:

$$\bar{d}^n = \frac{\bar{\theta}^n + \lambda\bar{\theta}^{n+1}/(n+1)}{1 + \lambda\bar{\theta}} \quad (4)$$

где \bar{d}^n , $\bar{\theta}^n$ – начальные моменты распределенной величины дополнительной задержки и длительности периода «разогрева» соответственно.

Используя соотношение (3) и формулу Такача [13] для начальных моментов времени ожидания в СМО вида $M/G/1$ (без «разогрева»):

$$\bar{\omega}^n = \frac{\lambda}{1 - \lambda\bar{b}} \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} \bar{b}^{i+1} \bar{\omega}^{n-i}, \quad (5)$$

определим начальные моменты общей задержки в одноканальной СМО с «разогревом» вида $M/\theta G/1$ воспользовавшись соотношением для начальных моментов суммируемых случайных величин:

$$\bar{\omega}_{\Sigma}^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \bar{d}^i \bar{\omega}^{n-i} \quad (6)$$

Для расчета временных характеристик СМО с «разогревом» вида $M/\theta G/1$ можно воспользоваться аппроксимацией распределения времени ожидания гиперэкспоненциальным распределением [14] вида:

$$v(t) = \alpha\mu_1 e^{-\mu_1 t} + (1 - \alpha)\mu_2 e^{-\mu_2 t}. \quad (7)$$

Параметры аппроксимации (7) при известных начальных моментах (5) и (6) могут быть рассчитаны по формулам:

$$\mu = \frac{v_1 v_2 - v_3 \pm \sqrt{D}}{2(v_2^2 - v_1 v_3)} \quad (8)$$

$$\alpha = (\mu_1 \mu_2 v_1 - \mu_1) / (\mu_2 - \mu_1), \quad (9)$$

где $D = (v_3 - v_1 v_2)^2 - 4(v_2^2 - v_1 v_3)(v_1^2 - v_2)$, $\bar{v}_n = \bar{\omega}_{\Sigma}^n / n!$.

Зная выражение для функции распределения общей задержки, можно оценить значения вероятности своевременной передачи сообщений и, соответственно, вероятности превышения допустимой задержки (потери) сообщений:

$$V(t) = 1 - \alpha e^{-\mu_1 t} - (1 - \alpha) e^{-\mu_2 t}. \quad (10)$$

Вероятность превышения P_{np} допустимой задержки t_0 найдем из выражения:

$$P_{пр}(t_0) = 1 - V(t_0) \quad (11)$$

На рисунках 3а-3г представлены графики, отражающие результаты оценивания эффективности применения разработанной модели. Так, на указанных графиках приведено сравнение известной модели обслуживания с «разогревом», использующей предположение об экспонен-

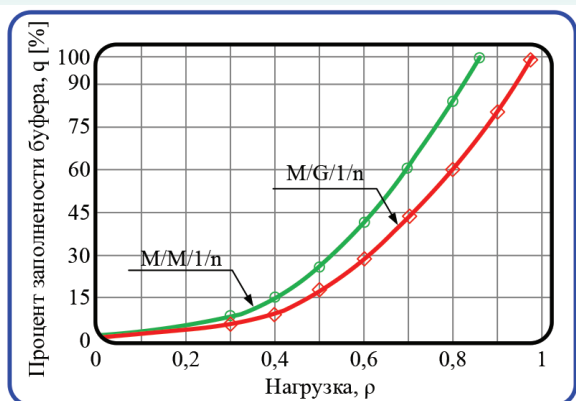


Рис. 3а. Зависимость длины очереди от нагрузки

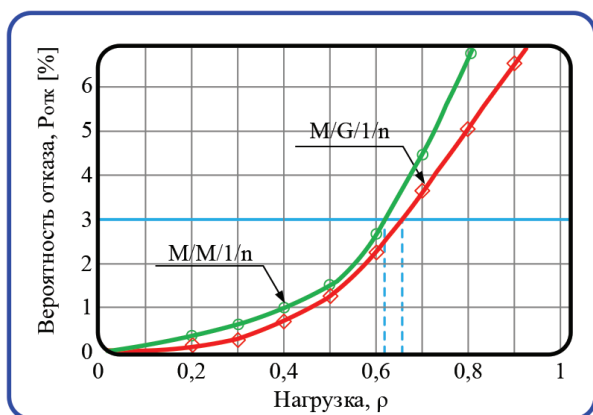


Рис. 3б. Зависимость вероятности потери сообщений от нагрузки

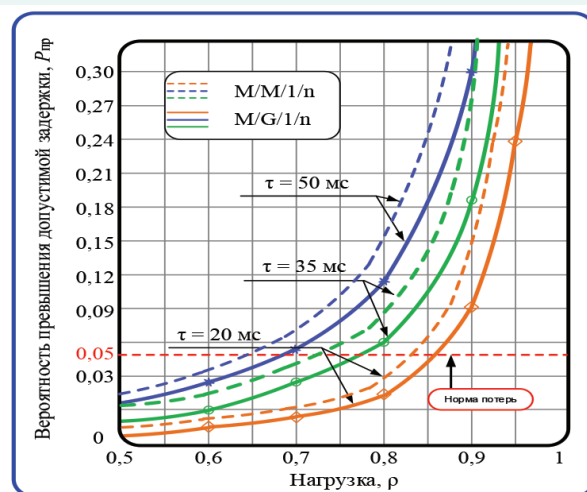


Рис. 3в. Распределение вероятности превышения допустимой задержки $P_o(t_s)$

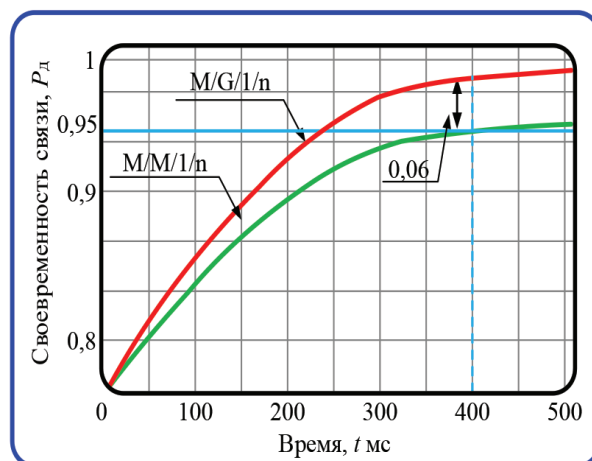


Рис. 3г. Распределение вероятности доставки сообщений за заданное время

циальном характере распределения времен и разработанной моделью, использующей более сложное распределение, позволяющее уточнить статистические характеристики узла коммутации.

Для сравнения были выбраны такие параметры качества обслуживания как зависимость средней длины очереди и вероятности потери сообщений от нагрузки, распределение вероятности превышения допустимой задержки для интерактивного информационного потока и распределение вероятности доставки сообщений за заданное время.

Исследование показало, что использование разработанной модели позволяет обоснованно определить требования к параметрам системы резервирования ресурса и, как следствие, повысить вероятность доставки пакетов сообщений специальной информации за заданное время.

На рисунке 4 показано как увеличение вероятности доставки сообщений за счет использования уточненной модели процесса реконфигурации узла сети сказывается на повышении устойчивости сети связи в целом.

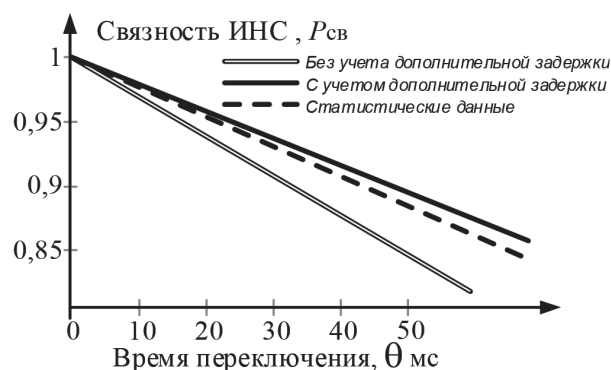


Рис. 4. Распределение вероятности связности при различном времени переключения

Заключение

В статье представлена модель оперативной реконфигурации узла сети системы информационного обмена на основе немарковских систем

обслуживания с «разогревом». В отличие от [15, 16], в разработанной модели снято допущение об экспоненциальном распределении периодов «разогрева» и длительности обслуживания сообщений.

Получено аналитическое выражение (4) для вычисления начальных моментов дополнительной задержки в следствии «разогрева», предложено аппроксимировать распределение времени дополнительной задержки на основе гиперэкспоненциального распределения.

Получены оценки вероятности превышения допустимой задержки в зависимости от нагрузки и времени «разогрева», что позволяет обосновать требования к времени переключения и настройки резервных каналов, а также к уровню допустимой нагрузки на резервный канал.

Представленная в работе модель может быть использована при модернизации существующих и проектировании перспективных систем информационного обмена.

Литература

1. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013. № 4 (12). С. 69-79.
2. Цветков К.Ю., Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы, 2014. № 2 (69). С. 71-78.
3. Макаренко С.И., Квасов М.Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии, 2016. Т.14. № 3. С. 264-274.
4. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы, 2014. №2(69). С. 79-86.
5. Новиков Е.А., Макаренко С.И. Оперативное управление ресурсом АТМ-коммутатора при обеспечении заданного качества обслуживания нестационарных информационных потоков // Радиотехни-

ские и телекоммуникационные системы, 2013. № 1 (9). С. 43-52.

6. Новиков Е.А., Зиннуров С.Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности, 2017. №1. С. 98-115.

7. Новиков Е.А., Павлов А.Р., Зиннуров С.Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение, 2014. № 5. С. 14-23.

8. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф. Динамическое перераспределение пропускной способности коммутируемого спутникового моноканала при использовании протоколов множественного доступа // Информационно-управляющие системы, 2006. № 5. С. 47-50.

9. Топорков И.С., Ковальский А.А., Зиннуров С.Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании разнородного нестационарного трафика // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С. 37-47.

10. Кантор Л.Я. Спутниковая связь и вещание. М.: Наука, 1997. 205 с.

11. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. Пер. с англ./ Под ред. Морозовой И.Е. М.: Наука, 1975. 360 с.

12. Романовский В.И. Математическая статистика. АН Уз.ССР. Ташкент, 1961. 256 с.

13. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Под ред. В.И.Неймана. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

14. Бочаров П.П., Литвин В.Г. Методы анализа и расчета систем массового обслуживания с распределением фазового типа // Автоматика и телемеханика, 1986. №5. С.5-23.

15. Гиндин С.И., Хомоненко А.Д., Ададунов С.Е. Численный расчет многоканальной системы массового обслуживания с рекуррентным входящим потоком и "разогревом" // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2013. №4(37). С. 92-101.

16. Косяков Е.Н., Квасов М.Н., Митряев Г.А. Модель обслуживания телетрафика в ненадежном спутниковом канале с учетом задержки подключения резерва // В сборнике: Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. III Всероссийская НПК. ВКА им. А.Ф.Можайского. Санкт-Петербург, 2016. С. 358-360.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 538.958

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ОСЕЙ NV-ЦЕНТРОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА

DEFINITION OF THE NV-CENTERS ORIENTATION RELATIVELY TO THE CRYSTAL PLANE

Павел Александрович Семёнов

кандидат физико-математических наук, профессор
профессор кафедры
Национальный исследовательский
ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт»
Адрес: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7(985)788-56-99
E-mail: Pavel.Semenov@ihep.ru

Николай Сергеевич Кукин

кандидат технических наук
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: n.s.kukin@mail.ru

Анна Руслановна Мурадова

студентка магистратуры
Московский авиационный институт
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Александр Николаевич Васильев

доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры
Национальный исследовательский
ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт»
Адрес: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7(985)788-56-99
E-mail: alexander.vasiliev@ihelp.ru

Ирина Олеговна Корчевая

студентка магистратуры
Московский авиационный институт
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Аннотация

Исследуется электронный спиновый резонанс ансамбля NV-центров в кристалле алмаза, полученного методом CVD. Кристалл алмаза имел концентрацию азота равную 1 ppm. Четыре возможных ориентации NV-центра в кристаллической решетке приводят к различным зависимостям величины и ориентации внешнего статического магнитного поля. Было использовано поле величиной 35 Гс с вектором в плоскости кристалла. Можно вращать его под определенным углом в пределах 360 градусов вокруг нормального вектора к плоскости кристалла. Целью являлось определение ориентаций четырех осей NV-центров относительно плоскости кристалла. Экспериментальные результаты, полученные при комнатной температуре с непрерывным микроволновым возбуждением, хорошо согласуются с представленными симуляциями.

Ключевые слова: квантовые системы, NV-центры в алмазе, магнитное поле, ориентации осей.

Summary

We investigate the electron spin resonance of an ensemble of Nitrogen-Vacancy (NV) color centers in a bulk diamond crystal obtained by CVD-method. The diamond crystal had 1 ppm concentration of nitrogen. The four possible orientations of the NV-center in the crystal lattice lead to different dependences of the magnitude and the orientation of the external static magnetic field. We used the field of 35 Gauss with the vector in the plane of the crystal. We could rotate it to a certain angle within almost 360 degrees around the normal vector to the plane of the crystal. The goal was to define the unknown orientations of the four axes of the NV-centers relatively to the crystal plane. Experimental results obtained at room temperature with a continuous microwave excitation and presented in this paper are in a good agreement with our simulations.

Key words: quantum systems, NV-centers in diamond, magnetic field, orientation of the axes.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение

Спин электрона в NV (азот-вакансия) цветных центрах в кристаллах алмаза является твердотельным кубитом, пригодным для использования в различных областях квантовых информационных технологий, и позволяет измерять с высокой точностью магнитные поля на наномасштабе. Из-за C_{3v} симметрии NV-центров каждый дефект в алмазе имеет четыре возможные ориентации в кристаллической решетке. В рамках настоящей работы исследовался образец с большим ансамблем NV-центров в алмазе.

В общем случае из-за неточностей при обработке поверхности образца алмаза и неоднородности внешнего магнитного поля ориентация осей NV-центров относительно внешнего магнитного поля не известна или известна с ограниченной точностью. Задача состояла в том, чтобы определить неизвестные ориентации четырех осей NV-центров относительно внешнего магнитного поля в центре изучаемого образца.

Для решения поставленной задачи в данной работе исследовалось влияние внешнего постоянного магнитного поля на резонансное поведение спина электрона в NV-центрах в алмазе при комнатной температуре. Измерялась интенсивность фотолюминесценции NV-центра как функция частоты микроволнового поля в оптически детектируемом магнитном резонансе (ОДМР) в присутствии внешнего магнитного поля. Внешнее постоянное магнитное поле должно быть параллельно оси кристалла, чтобы было максимальное расщепление $m_s = \pm 1$ энергетических уровней NV-центров именно для этой оси в кристалле алмаза. В данной работе вектор внешнего магнитного поля величиной 35 Гс находился в плоскости кристалла алмаза и мог быть повернут вокруг нормали к плоскости на любой угол в пределах почти 360 градусов. Вектор микроволнового магнитного поля с частотой в районе 2,87 ГГц был перпендикулярен этой плоскости. Результаты экспериментальных измерений сравниваются с результатами проведенного нами теоретического моделирования исследуемого процесса.

Проведение эксперимента и результаты

В качестве объекта исследования был взят монокристалл алмаза, полученный методом CVD, и имеющий большую (более ppm) концентрацию NV-центров. Для определения ориентации осей NV-центров была использована лабораторная установка, описанная в [1]. Дополнительно было реализовано нарушение пространственной симметрии путем введения постоянного внешнего магнитного поля в плоскости монокристалла с возможностью его поворота на за-

данный угол вокруг нормали к поверхности монокристалла.

В соответствии со структурой кристалла алмаза возможны четыре направления осей NV-центров (рисунк 1).

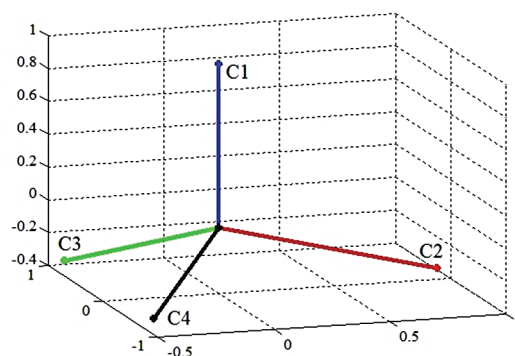


Рис. 1. Возможные направления осей NV-центров

На рисунке 1 в декартовой системе координат эти направления задаются векторами:

$$\begin{aligned} C1 &= (0 \ 0 \ 1)^T \\ C2 &= \left(\frac{2\sqrt{2}}{3} \ 0 \ -\frac{1}{3} \right)^T \\ C3 &= \left(-\frac{\sqrt{2}}{3} \ \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \ -\frac{1}{3} \right)^T \\ C4 &= \left(-\frac{\sqrt{2}}{3} \ -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \ -\frac{1}{3} \right)^T \end{aligned} \quad (1)$$

и выделены соответственно синим, красным, зеленым и черным цветами.

При изменении частоты СВЧ излучения, воздействующего на NV-центры в монокристалле алмаза, возбуждаемые лазером с длиной волны 532 нм, наблюдаются сдвиги минимумов уменьшения интенсивности люминесценции (контрастности ОДМР) относительно центральной частоты 2,87 ГГц на величины, пропорциональные проекциям внешнего магнитного поля на направления NV-центров [2].

На рисунке 2 приведено изменение контрастности ОДМР при начальном положении внешнего магнитного поля относительно поверхности монокристалла (угол поворота – ноль градусов).

Аналогично были получены значения изменений контрастности люминесценции от частоты СВЧ излучения при повороте постоянного внешнего магнитного поля вокруг нормали к поверхности монокристалла на углы от 10° до 350° через 10°. Для удобства представления экспериментальные данные изменений контрастности приведены на рисунке 3 в виде контуров. Синим цветом обозначены области с максимальным падением люминесценции при воздействии СВЧ излучения, желтым – области без па-

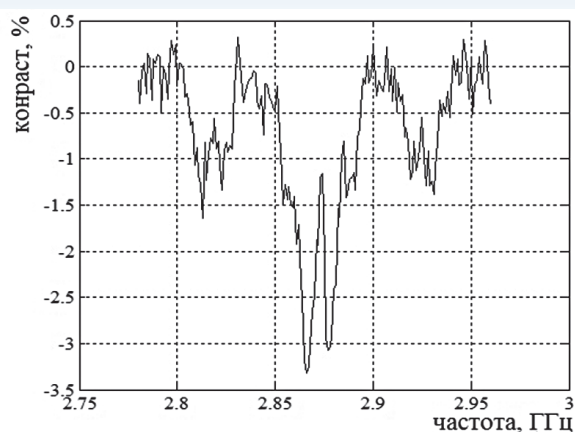


Рис. 2. Сигнал ОДМР при начальном положении внешнего магнитного поля

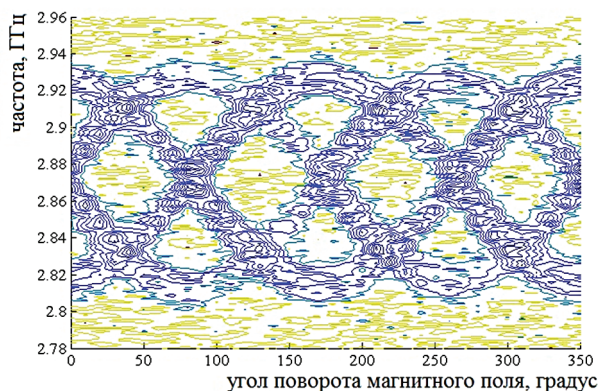


Рис. 3. Изменение сигнала ОДМР при вращении внешнего магнитного поля

дения. Светло синим цветом показаны промежуточные области.

С помощью математического моделирования было определено значение углового положения оси вращения внешнего магнитного поля относительно осей NV-центров. В системе координат, показанной на *рисунке 1*, ось вращения магнитного поля представляет собой вектор:

$$M = (-0,43 \quad 0,77 \quad 0,47)^T. \quad (2)$$

На *рисунке 4* показано расположение оси вращения внешнего магнитного поля. Для пояснения искажений, внесенных проекцией трехмерного изображения на плоскость, следует пояснить, что вектор M практически лежит в плоскости, образованной векторами $C1$ и $C3$.

На *рисунке 5* приведены расчетные траектории минимумов люминесценции при вращении внешнего магнитного поля вокруг оси M . Цветами выделены траектории минимумов, вызванных изменением проекции внешнего магнитного поля на соответствующее направление $C1$, $C2$, $C3$ или $C4$ при вращении магнитного поля вокруг оси M . Для наглядности траектории наложены на экспериментальные данные, показанные на *рисунке 3*.

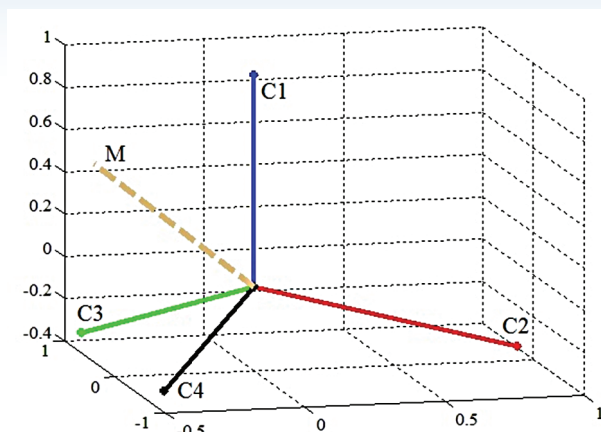


Рис. 4. Расположение оси вращения внешнего магнитного поля

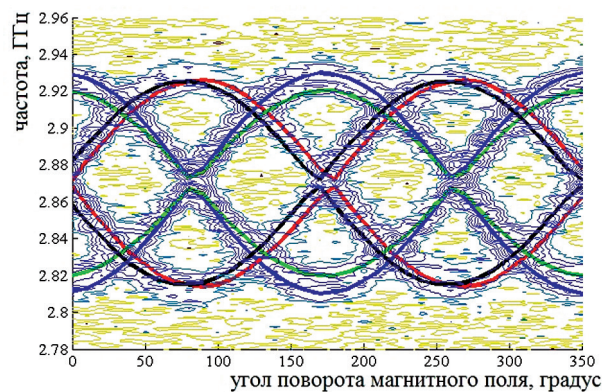


Рис. 5. Расчетные траектории минимумов изменений сигнала ОДМР при вращении внешнего магнитного поля

Заключение

В соответствии с *рисунком 5* можно сделать вывод об успешном определении ориентации осей NV-центров в монокристалле алмаза относительно оси вращения внешнего постоянного магнитного поля, которая по постановке эксперимента совпадает с нормалью к поверхности кристалла.

Литература

1. Васильев А.Н., Смуров С.В., Семёнов П.А., Кукин Н.С., Бухтияров А.А., Капусткин Д.О. Экспериментальное наблюдение оптически детектируемого магнитного резонанса в кристалле алмаза с примесями азота // Известия Института инженерной физики, 2016. №2 (40). С.40-44.
2. Васильев А.Н., Смуров С.В., Семёнов П.А., Кукин Н.С., Бухтияров А.А., Капусткин Д.О., Глотова И.О., Мурадова А.Р. Исследование осцилляций Раби в кубитах кристалла алмаза с использованием зеленого лазера // Известия Института инженерной физики, 2017. №1(43), С.25-30.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.052.42

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
МНОГОПОТОЧНОЙ ПРОГРАММЫ ЭВМ,
ПОСТРОЕННАЯ НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДОВ
МЕЖДУ ФУНКЦИЯМИ ИСХОДНОГО КОДА**

**MATHEMATICAL MODEL OF A
MULTITHREADED PROGRAM OF
COMPUTERS BUILT ON THE BASIS OF
TRANSITIONS BETWEEN THE FUNCTIONS
OF THE SOURCE CODE**

Дмитрий Андреевич Моргунов

аспирант
ведущий инженер-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-91
E-mail: mor.dmitrij@gmail.com

Артем Геннадьевич Букин

кандидат технических наук, доцент
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-91
E-mail: bukin.artem@gmail.com

Аннотация

В статье описывается способ построения математической модели многопоточной программы, позволяющей описать все пути выполнения каждого из потоков на уровне передачи управления между функциями. Представленная модель позволяет осуществлять процесс верификации программы для обнаружения ошибок, приводящих к ситуациям «гонок» и взаимоблокировок.

Ключевые слова: многопоточная программа, формализация программы, обнаружение ошибок, верификация программы, model checking.

Summary

The article describes a method for constructing a mathematical model of a multithreaded program that allows to describe all the execution paths of each of the threads at the level of control transfer between functions. The presented model allows to carry out the process of verification of the program for detecting errors leading to situations of data races and deadlocks.

Keywords: multithreaded program, formalization of the program, error detection, verification of the program, model checking.

Введение

Процесс разработки многопоточной программы ЭВМ подразумевает этапы проверки ее работоспособности, поиска и исправления допущенных программистом ошибок, что занимает не менее 30% всей стоимости разработки [1].

Любая многопоточная программа состоит из основного потока выполнения и одного или нескольких дочерних потоков. На выполнение каждого из потоков выделяется некоторое количество тактов процессора (процессорное время). Взаимодействие потоков друг с другом и переключение потоков операционной системой может породить отказы, свойственные только многопоточным программам [2]. Существуют следующие виды отказов многопоточной программы:

- ситуация «удушения» («истощения»);
- ситуация «гонки»;
- взаимоблокировка.

Самым распространенным способом обнаружения ошибок в программах является тестирование, но оно требует недопустимо больших временных затрат в случае программ, обрабатывающих большие наборы входных данных или имеющих большое количество состояний [3]. Причем такие виды отказов многопоточных программ, как ситуации «гонок» и взаимоблокировок, могут не проявить себя во время тестирования, даже при наличии ошибки. Поскольку полное тестирование нерационально и не всегда способно выявить отказ, разработаны различные способы обнаружения ошибок в программах.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

В настоящее время для обнаружения ошибок в программах применяется метод верификации, который позволяет определить соответствие рассматриваемой программы требуемым свойствам. Автоматизация процесса верификации возможна проверкой на модели (Model Checking), состоящей из следующих этапов:

- 1) создание математической модели проверяемой программы;
- 2) построение спецификаций – формализованного представления проверяемых свойств программы;
- 3) проверка выполнения спецификации на построенной модели.

Существующие модели программ опираются на значения переменных в процессе исполнения в некоторый момент времени [4, 5]. Таким моделям присущи следующие недостатки:

- переменные динамически создаются и уничтожаются в процессе исполнения программы, что затрудняет процесс сопоставления каждого состояния программы со значением всех ее переменных в различные моменты времени;
- высокие вычислительные затраты на выполнение процесса верификации, поскольку современные программы обладают большим объемом исходного кода с множеством переменных;
- избыточность математической модели.

Таким образом, актуальной задачей является разработка математической модели многопоточной программы ЭВМ для выполнения процесса верификации с целью обнаружения ошибок, приводящих к ситуациям «гонок» и взаимоблокировок.

Решение данной задачи подразумевает на основе заданного исходного кода многопоточной программы построить математическую модель, обладающую следующими свойствами:

- состояния программы не зависят от значений переменных;
- модель должна обладать достаточной информацией для определения ошибок, приводящих к ситуациям «гонок» и взаимоблокировок;
- модель должна обеспечивать возможность применения верификации проверкой на модели для обнаружения указанных ошибок.

Модель функциональных переходов многопоточной программы

Состоянием потока многопоточной программы в модели функциональных переходов является содержимое стека вызова функций. Под переходом между состояниями понимается передача управления от одной функции к другой. Инструкция прямого вызова функции определяет немедленную передачу управления вызы-

ваемой функции. Инструкция отложенного вызова функции определяет передачу управления вызываемой функции после завершения выполнения текущей последовательности функций.

Таким образом, многопоточная программа состоит из множества наборов инструкций исходного кода

$$I = \{I^i\}, \quad i = \overline{0, K_i - 1}, \quad (1)$$

где I^i – множество наборов инструкций исходного кода, исполняемых i -м потоком;

K_i – количество потоков в программе при минимальном количестве однородных потоков.

Множество I^i наборов инструкций исходного кода, исполняемых i -м потоком, имеет вид

$$I^i = \{f_j^i\}, \quad j = \overline{0, K_f^i - 1}, \quad (2)$$

где f_j^i – некоторая функция, исполняемая i -м потоком;

K_f^i – количество функций, исполняемых i -м потоком.

Функция f_j^i представлена кортежем

$$f_j^i = \left(inst_p^{f_j^i} \right), \quad p = \overline{0, K_{inst}^{f_j^i} - 1}, \quad (3)$$

где $inst_p^{f_j^i}$ – некоторый набор инструкций в функции f_j^i ;

$K_{inst}^{f_j^i}$ – количество наборов инструкций в функции f_j^i .

В общем виде модель функциональных переходов M_p многопоточной программы описывается выражением

$$M_p = \left(M_i^i, Tb \right), \quad i = \overline{0, K_i - 1}, \quad (4)$$

где M_i^i – модель функциональных переходов i -го потока;

Tb – множество метаданных о множестве наборов инструкций исходного кода I .

Модель функциональных переходов i -го потока включает в себя:

- множество состояний i -го потока программы $S^i \subset S$, где $S = \{S^j\}$, $j = \overline{0, K_i - 1}$ – множество, состоящее из множеств состояний каждого потока;

- множество переходов между состояниями i -го потока программы $R^i \subset R$, где $R = \{R^j\}$, $j = \overline{0, K_i - 1}$ – множество, состоящее из множеств переходов между состояниями каждого потока;

- множество меток в множестве наборов инструкций, исполняемых i -м потоком, $L^i \subset L$, где $L = \{L^j\}$, $j = \overline{0, K_i - 1}$ – множество, состоящее из множеств меток в множестве наборов инструкций, исполняемых каждым потоком.

В общем виде модель функциональных переходов i -го потока описывается кортежем

$$M_i^i = \left(S^i, R^i, L^i \right). \quad (5)$$

Схема построения модели функциональных переходов представлена на рисунке 1.

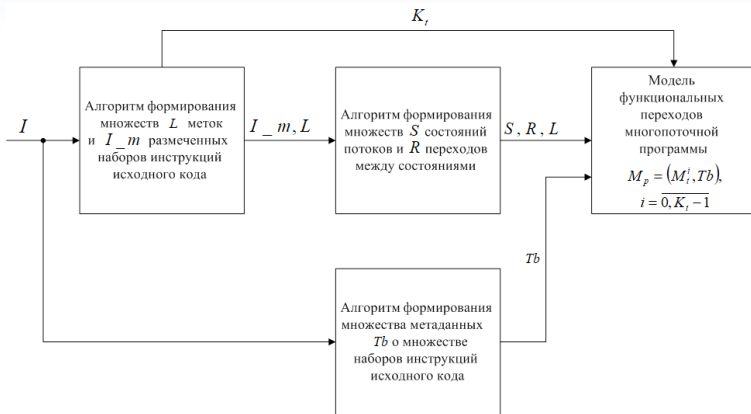


Рис. 1. Схема построения модели функциональных переходов

Множество L и множество I_m размеченных наборов инструкций исходного кода строятся в результате выполнения алгоритма формирования множеств меток и размеченных наборов инструкций исходного кода над I . Множества S и R строятся в результате выполнения алгоритма формирования множеств состояний потоков и переходов между состояниями над I_m и L . Множество Tb строится в результате выполнения алгоритма формирования множества метаданных о множестве наборов инструкций исходного кода над I . Модель M_p функциональных переходов многопоточной программы формируется из множеств S, R, L, Tb с учетом количества потоков K_i .

Алгоритм формирования множеств меток и размеченных наборов инструкций исходного кода программы

Построение множеств L и I_m осуществляется путем выполнения алгоритма формирования множеств меток и размеченных наборов инструкций программы над I .

Множество меток L^i в множестве наборов инструкций I , исполняемых в i -м потоке, имеет вид

$$L^i = \{l_j^i\}, \quad j = 0, K_L^i - 1, \quad (6)$$

где l_j^i – некоторая метка в множестве L^i ;

$K_L^i = |L^i|$ – количество меток в множестве наборов инструкций I , исполняемых в i -м потоке. Множества L^i и I_m^i в начальный момент времени объявляются пустыми.

Все метки попарно различны, то есть для $\forall j, p$ выполняется $l_j \neq l_p$ при $j \neq p, l_j \in L, l_p \in L$.

Метка l_j^i представляет собой кортеж

$$l_j^i = (\text{thread}, \text{object}, \text{function}, \text{id}), \quad (7)$$

где thread – поток, из которого идет обращение к функции, в которую добавляется метка;

object – полное имя объекта, содержащего функцию, в которую добавляется метка;

function – имя функции, в которую добавляется метка;

id – идентификатор метки внутри размечаемой функции.

В силу того, что реализация функций, входящих в среду разработки, скрыта от программиста, вызовы таких функций игнорируются при разметке (за исключением запуска цикла событий). Помимо этого, игнорируются рекурсивные вызовы функций. Алгоритм формирования множеств меток и размеченных наборов инструкций программы заключается в последовательном выделении наборов инструкций исходных кодов программы, исполняемых каждым из потоков, где все функции дополняются набором меток за счет последовательного применения оператора Mark_i к инструкциям, из которых состоит функция.

Применение оператора обработки Mark_i к набору инструкций $\text{inst}_p^{f_j^i}$, отличному от набора инструкций окончания функции f_j^i , имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Mark}_i(\text{inst}_p^{f_j^i}) &= (\text{inst}_p^{f_j^i} \neq \text{end}(f_j^i)) \wedge \\ &\wedge \text{mark_inst}(\text{inst}_p^{f_j^i}) \wedge \text{add_to_cortege}(f_m^i, \text{inst}_m^{f_j^i}) \wedge \\ &\wedge (L^i = (L^i \cup L^{\text{inst}_m^{f_j^i}})) \wedge \\ &\wedge \left[\bigwedge_{r=0}^{K_f^{\text{inst}_m^{f_j^i}} - 1} ((f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}} \neq f_j^i) \wedge (L^{f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}}} = \emptyset)) \wedge \right. \\ &\quad \left. \wedge \text{Mark}_f(f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}}) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\text{end}(f_j^i)$ – условное обозначение набора инструкций окончания функции f_j^i ;

$\text{mark_inst}(\text{inst}_p^{f_j^i})$ – условное обозначение процедуры добавления меток в набор инструкций $\text{inst}_p^{f_j^i}$;

$\text{inst}_m^{f_j^i}$ – размеченное представление набора инструкций $\text{inst}_p^{f_j^i}$;

$\text{add_to_cortege}(f_m^i, \text{inst}_m^{f_j^i})$ – условное обозначение добавления компоненты $\text{inst}_m^{f_j^i}$ в кортеж f_m^i ;

f_m^i – размеченное представление функции f_j^i ;

$L^{\text{inst}_m^{f_j^i}}$ – множество меток размеченного набора инструкций $\text{inst}_m^{f_j^i}$;

$K_f^{\text{inst}_m^{f_j^i}}$ – количество вызовов функций (как прямых, так и отложенных) в размеченном наборе инструкций $\text{inst}_m^{f_j^i}$;

$f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}}$ – функция, вызываемая из размеченного набора инструкций $\text{inst}_m^{f_j^i}$;

$\text{Mark}_f(f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}})$ – оператор обработки функции $f_r^{\text{inst}_m^{f_j^i}}$.

Здесь и далее символ \wedge означает одновременное наличие или исполнение элементов в указанном порядке.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Применение оператора обработки $Mark_i$ к набору инструкций $inst_p^{f_j}$ окончания функции f_j^i имеет вид

$$Mark_i(inst_p^{f_j}) = (inst_p^{f_j} \equiv end(f_j)) \wedge \wedge add_to_cortege(f_m_j, inst_m_p) \wedge \quad (9)$$

$\wedge (I_m^i = (I_m^i \setminus \{f_m_j^i\})) \wedge return_mark(f_r^i \rightarrow f_j^i), r \neq j$, где $return_mark(f_r^i \rightarrow f_j^i)$ – условное обозначение возвращения процесса разметки в функцию f_r^i , из которой была вызвана функция f_j^i .

Алгоритм формирования множеств состояний потоков и переходов между состояниями

Множества S и R строятся в результате выполнения алгоритма формирования множеств состояний потоков и переходов между состояниями над I_m и L .

Множество состояний S^i в (5) i -го потока программы имеет вид

$$S^i = \{S_p^i\}, p = \overline{0, K_s^i - 1}, \quad (10)$$

где S_p^i – некоторое состояние i -го потока программы;

$K_s^i = |S^i|$ – количество состояний i -го потока программы.

При этом множество состояний S^i должно обладать следующим свойством:

$$\text{для } \forall p, r \exists \pi(S_p^i, S_r^i) \text{ при } p \neq r, \quad (11)$$

где $\pi(S_p^i, S_r^i)$ – путь из состояния S_p^i в состояние S_r^i .

Под путем из S_p^i в S_r^i понимается последовательность состояний, начинающаяся в состоянии S_p^i и заканчивающаяся в состоянии S_r^i :

$$\pi(S_p^i, S_r^i) = (S_p^i, \dots, S_r^i), \quad (12)$$

причем на протяжении всего пути существует переход из S_t^i в S_{t+1}^i для $\forall t = \overline{p, r-1}$.

Состояние S_p^i описывается набором меток:

$$S_p^i = \bigwedge_{r=0}^{K_s^i - 1} l_r^i, l_r^i \in L^i, \quad (13)$$

где K_s^i – количество меток.

В начальном состоянии i -го потока, которое обозначается S_0^i , отсутствуют выполняемые потоком действия. Состоянию S_0^i не соответствует ни одна из меток множества L^i . Множество S^i в начальный момент времени принимается равным $\{S_0^i\}$.

Множество переходов между состояниями R^i в (5) i -го потока имеет вид

$$R^i = \{R_j^i\}, j = \overline{0, K_r^i - 1}, \quad (14)$$

где $R_j^i = (S_p^i, S_r^i)$ – переход из состояния S_p^i в состояние S_r^i , $p \neq r$;

$K_r^i = |R^i|$ – количество переходов между состояниями i -го потока. Множество R^i в начальный момент времени объявляется пустым.

Для определения множества состояний S^i i -го

потока и множества переходов между ними R^i используются дополнительные переменные pos – состояние потока, в котором происходит процесс выполнения алгоритма, и pos' – состояние потока, в которое переходит процесс выполнения алгоритма после обработки набора инструкций.

В ходе выполнения алгоритма, из множества I_m последовательно выделяются множества I_m^i размеченных наборов инструкций, выполняемых каждым из потоков. Для реализации алгоритма используется дополнительное множество $Dif_call_{f^i}$ функций, обращение к которым выполняется через отложенный вызов в i -м потоке. Множество $Dif_call_{f^i}$ в начальный момент времени объявляется пустым. Обработка множества I_m^i выполняется из состояния S_0^i применением оператора Det_SR_f к размеченной функции f_m^i , с которой начинается самостоятельное функционирование потока.

Применение оператора Det_SR_f определения множества состояний и переходов между ними к кортежу размеченных инструкций f_m^i , вызываемому из состояния S_p^i , имеет вид

$$Det_SR_f(S_p^i, f_m^i) = (pos = S_p^i) \wedge \wedge_{t=0}^{K_{inst}^{f_m^i} - 1} \left(\left(\begin{array}{l} Det_SR_inst(S_p^i, inst_m_0^{f_m^i}), \text{если } t = 0; \\ Det_SR_inst(S_{inst_{t-1}^{f_m^i}}, inst_m_t^{f_m^i}), \text{если } t \neq 0, \end{array} \right) \wedge \begin{array}{l} pos' = S_r^i, r \neq 0, r \neq p, \text{если } f_m_j^i \neq f_m_0^i; \\ pos' = S_0^i, \text{если } f_m_j^i = f_m_0^i, \end{array} \right) \wedge \left[((S^i \cap \{pos'\}) = \emptyset) \wedge (S^i = (S^i \cup \{pos'\})) \right] \wedge \wedge det_transition_func_end(f_m^i, pos'), \quad (15)$$

где $Det_SR_inst(S_{inst_{t-1}^{f_m^i}}, inst_m_t^{f_m^i})$ – оператор определения множества состояний и переходов между ними в размеченном наборе инструкций $inst_m_t^{f_m^i}$;

$S_{inst_{t-1}^{f_m^i}}^{f_m^i}$ – состояние, в котором была завершена обработка размеченного набора инструкций $inst_m_{t-1}^{f_m^i}$;

$K_{inst}^{f_m^i}$ – количество инструкций в размеченной функции f_m^i ;

$S_r^i = (S_p^i \wedge next_label(f_m^i))$ – состояние, в котором завершается обработка функции $f_m_j^i \neq f_m_0^i$;

$next_label(f_m^i)$ – условное обозначение метки, находящейся непосредственно после вызова функции $f_m_j^i$ в функции, вызывающей f_m^i ;

$det_transition_func_end(f_m^i, pos')$ – процедура добавления в множество переходов R^i i -го потока переходов в состояние pos' из каждого состояния, в котором была завершена обработка функции f_m^i .

Процедура добавления в множество перехо-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

дов R^i i -го потока переходов в состояние S^i_{next} из каждого состояния, в котором была завершена обработка функции $f_{m_j^i}$, имеет вид

$$det_transition_func_end(f_{m_j^i}, S^i_{next}) = \left[R^i = \left(R^i \cup \left\{ \left(S^i_{end_f_j}, S^i_{next} \right) \right\} \right) \right], b = \overline{0, c-1}, \quad (16)$$

где $c = |S^{end_f_j^i}|$ – количество состояний, в которых была завершена обработка функции $f_{m_j^i}$;
 $S^{end_f_j^i}$ – множество состояний, в которых была завершена обработка функции $f_{m_j^i}$;
 $S^i_{end_f_j} \in S^{end_f_j^i}$ – некоторый элемент множества $S^{end_f_j^i}$.

Применение оператора Det_SR_inst к размеченному набору инструкций запуска цикла событий имеет вид

$$Det_SR_inst(S^i_p, inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}) = (inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}} \equiv event_loop) \wedge (pos = S^i_p) \wedge (f_{m_i^i}^{event_loop} = build_func_event_loop) \wedge Det_SR_f(S^i_p, f_{m_i^i}^{event_loop}) \wedge [pos' = S^i_x = (S^i_p \wedge next_label(f_{m_i^i}^{event_loop}))], \quad (17)$$

где $event_loop$ – условное обозначение набора инструкций прямого вызова функции запуска цикла событий;

$build_func_event_loop$ – процесс построения цикла событий в виде размеченной функции.

Применение оператора Det_SR_inst к размеченному набору инструкций, обозначающего отложенный вызов функции $f_{m_u^i}$, имеет вид

$$Det_SR_inst(S^i_p, inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}) = (inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}} \equiv diff_call(f_{m_u^i})) \wedge (pos = S^i_p) \wedge (Dif_call_f^i = (Dif_call_f^i \cup \{f_{m_u^i}\})) \wedge (pos' = S^i_p), \quad (18)$$

где $diff_call(f_{m_u^i})$ – условное обозначение набора инструкций отложенного вызова функции $f_{m_u^i}$.

Применение оператора Det_SR_inst к $inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}$, отличному от прямого вызова функции запуска цикла событий и отложенного вызова функции, имеет вид

$$Det_SR_inst(S^i_p, inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}) = \left[(inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}} \equiv diff_call(f_{m_i^i})) \wedge (inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}} \equiv event_loop) \wedge (pos = S^i_p) \wedge (S^i_0 = (S^i_p \wedge l_0^{inst_{m_i^i}})) \wedge \left[\left(S^i = (S^i \cup \{S^i_0\}) \right) \wedge \left[R^i = \left(R^i \cup \left\{ \left(S^i_p, S^i_0 \right) \right\} \right) \right], \text{если } is_def(S^i_p, S^i_0) = false; \right. \right. \\ \left. \left. Det_SR_f(S^i_p, f_{m_i^i}), \text{если } is_def(S^i_p, S^i_0) = true, \right] \wedge \left[\bigwedge_{u=0}^{K_i-2} \left(\bigwedge_{b=0}^{|L_d|-1} Det_SR_f(S^i_u, func(l_u^{inst_{m_i^i}}, La_b)) \right) \right] \wedge (pos' = S^i_c), c = (K_i - 1), z \neq j, \quad (19)$$

где S^i_0 – состояние, соответствующее метке $l_0^{inst_{m_i^i}}$;

$is_def(S^i_p, S^i_0)$ – функция определения наличия прямого вызова функции между состояниями S^i_p и S^i_0 ;

$f_{m_i^i}$ – функция, обращение к которой выполнено через прямой вызов между состояниями S^i_p и S^i_0 ;

K_i – количество меток в обрабатываемом размеченном наборе инструкций $inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}$;

$La = \{Lad\}$, $d = \overline{0, |La|-1}$, $La \subset L_{inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}}$ – множество меток, к которым доступен прямой переход от текущей метки $l_u^{inst_{m_i^i}}$, причем каждый прямой переход от $l_u^{inst_{m_i^i}}$ до Lad не содержит других меток для всех $0 \leq d < |La|$;

$l_c^{inst_{m_i^i}}$ – последняя метка в обрабатываемом размеченном наборе инструкций $inst_{m_i^i}^{f_{m_j^i}}$;

$func(l_u^{inst_{m_i^i}}, La_b)$ – условное обозначение прямого вызова функции, находящегося между метками $l_u^{inst_{m_i^i}}$ и La_b .

Алгоритм формирования множества метаданных о множестве наборов инструкций исходного кода

Множество Tb строится в результате выполнения алгоритма формирования множества метаданных о множестве наборов инструкций исходного кода над I . Множество метаданных имеет вид

$$Tb = \{Tb^i\}, i = \overline{0, K_i - 1}, \quad (20)$$

где Tb^i – множество метаданных о множестве I^i наборов инструкций, выполняемых i -м потоком.

Множество метаданных о множестве I^i наборов инструкций, выполняемых i -м потоком, имеет вид

$$Tb^i = \{Tb^{f_j^i}\}, j = \overline{0, K_f^i - 1}, \quad (21)$$

где $Tb^{f_j^i}$ – кортеж метаданных о функции f_j^i .

Кортеж метаданных о функции f_j^i имеет вид

$$Tb^{f_j^i} = (obj, func, thread, prot_obj, class), \quad (22)$$

где obj – объект, которому принадлежит функция f_j^i ;

$func$ – имя функции f_j^i ;

$thread$ – поток, из которого идет обращение к функции f_j^i ;

$prot_obj$ – объект защиты работы функции f_j^i в режиме многопоточности;

$class$ – класс объекта obj .

В ходе реализации алгоритма над множеством I последовательно выделяются множества I^i наборов инструкций, выполняемых каждым из потоков. Для каждого потока применяется оператор Det_Tb_f к элементам множества $Store^i$ функций, исполняемых i -м потоком, инициализируемого значением

$$\left(\{f_0^i\} \cup Dir_call_f^{event_loop^i} \right), \quad (23)$$

где f_0^i – функция, с которой i -й поток начинает

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

самостоятельное функционирование;

$Dir_call_f^{event_loop^i}$ – множество функций, обращение к которым выполняется напрямую из цикла событий i -го потока.

Применение оператора Det_Tb_f формирования кортежа метаданных к функции f_j^i имеет вид

$$Det_Tb_f(f_j^i) = (Tb^{f_j^i} = create_tb(f_j^i)) \wedge \\ \wedge \left((Tb^i \cap \{Tb^{f_j^i}\}) = \emptyset \right) \wedge \left(Tb^i = (Tb^i \cup \{Tb^{f_j^i}\}) \right) \wedge \\ \wedge append_Store(f_j^i), \quad (24)$$

где $create_tb(f_j^i)$ – условное обозначение процесса формирования кортежа метаданных о функции f_j^i ; $append_Store(f_j^i)$ – условное обозначение процедуры обработки содержимого функции f_j^i для дополнения множества $Store^i$ функциями, вызываемыми из f_j^i .

Процедура обработки содержимого функции f_j^i для дополнения множества $Store^i$ функциями, вызываемыми из f_j^i , представлена выражением

$$append_Store(f_j^i) = \\ = \left(Store^i = \left(Store^i \cup Dir_call_f^{inst_p^{f_j^i}} \cup Dif_call_f^{inst_p^{f_j^i}} \right) \right), \quad (25)$$

$$p = 0, K_{inst}^{f_j^i} - 1,$$

где $inst_p^{f_j^i} \in f_j^i$ – некоторый набор инструкций функций f_j^i ;

$Dir_call_f^{inst_p^{f_j^i}}$ – множество функций, обращение к которым выполняется напрямую из инструкции $inst_p^{f_j^i}$;

$Dif_call_f^{inst_p^{f_j^i}}$ – множество функций, обращение к которым выполняется через отложенный вызов из инструкции $inst_p^{f_j^i}$.

Заключение

Представленные в статье математическая модель и алгоритмы формирования ее компонентов позволяют описать все пути выполнения каждого из потоков многопоточной программы на уровне передачи управления между функциями. Как видно из (15), множество переходов разработанной модели тотально, то есть выполняется свойство (11), что позволяет использовать модель функциональных переходов для верификации [5, 6] многопоточных программ с целью обнаружения ошибок, приводящих к

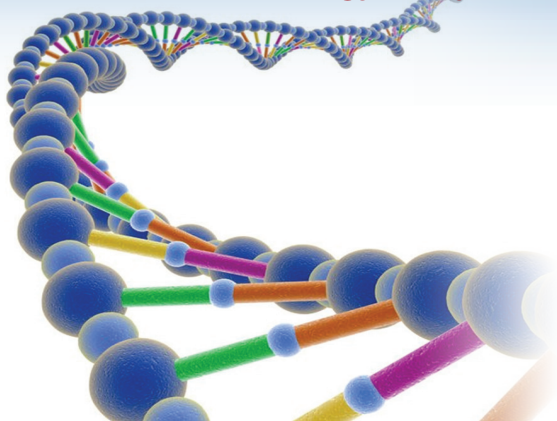
взаимоблокировкам. Проверяемые в процессе верификации спецификации формируются на основе множества метаданных Tb . Особая структура меток, добавляемых в исходный код, позволяет по описанию состояния программы определить путь, исполнение которого привело к ошибке, без поиска контрпримера, что также уменьшает временные затраты. Обнаружение ситуаций «гонок» возможно путем статического анализа множества метаданных Tb . Сложность представленных алгоритмов составляет $O(N)$ относительно количества вызовов функций.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет уменьшить временные затраты на осуществление процесса обнаружения в многопоточных программах ошибок, приводящих к ситуациям «гонок» и взаимоблокировкам, за счет сокращения количества обрабатываемых состояний при применении верификации. На основе представленной математической модели возможно создание программной реализации автоматической верификации многопоточных программ с целью обнаружения указанных ошибок.

Литература

1. Гудков А.М., Завозкин С.Ю., Трофимов С.Н. Технология разработки программного обеспечения. Учебное пособие. Кемерово, 2009. 138 с.
2. Уильямс Э. Параллельное программирование на C++ в действии. Практика разработки многопоточных программ. Пер. с англ. Слинкин А.А. М.: ДМК Пресс, 2014. 672 с.: ил.
3. Канер С. и др. Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений: Пер. с англ. / Сэм Канер, Джек Фолк, Энг Кек Нгуен. М.: Издательство «ДиаСофт», 2001. – 544 с.
4. Кулямин В.В. Методы верификации программного обеспечения. М.: Институт Системного Программирования РАН, 2008. 117 с.
5. Карпов Ю.А. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб.: БВХ-Петербург, 2010. 560 с.: ил. + CD-ROM
6. Кларк Э.М., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программы: Model Checking. Пер. с англ. / Под ред. Р. Смелянского. М.: МЦНМО, 2002. 416 с.: ил.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



УДК 519.21; 519.713; 524.852; 53.02; 575.224

СТОХАСТИКА И МУТАЦИИ В УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ*

STOCHASTICS AND MUTATIONS IN THE UNIVERSAL PERIOD-TRIPLING SYSTEM

Валерий Александрович Коломбет
кандидат физико-математических наук
заведующий лабораторией
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: kolombet@iteb.ru

Александр Владимирович Елистратов
ведущий инженер
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-92-62
E-mail: unenlagia@yandex.ru

Евгений Валерьевич Коломбет
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7(4967)73-94-64
E-mail: kvision@mail.ru

Владимир Юрьевич Архипов
старший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-92-62
E-mail: arkhivov@gmail.com

Вадим Николаевич Лесных
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: 1253vadim@mail.ru

Ольга Юзефовна Серая
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-92-62
E-mail: olga_seraya@yahoo.com

Аннотация

Статья посвящена описанию математической модели фундаментального физического феномена – универсальной системы утраивающихся периодов, проявляющейся, в частности, в спектре тактовых частот процессоров, в работе радаров и множества других технических устройств. Приводятся данные об особенностях проявления универсальной системы утраивающихся периодов в механизме зрения, в том числе новые данные о наблюдении в цветовом зрении птиц так называемой опережающей серии универсальной системы утраивающихся периодов.

Ключевые слова: дискретный спектр частот, цикл утроения периода, удвоение периода, универсальная система утраивающихся периодов, зрение человека, зрение птиц, планковский масштаб, треугольник Серпинского, математическая модель, стохастика, мутации, дубликатор, трипликатор.

Summary

The article is concerned with the description of a mathematical model of a fundamental physical phenomenon – a universal system of tripling periods, manifested, in particular, in the spectrum of processor clock speeds, operation of radar and of many other technical devices. This is based on the data on the behavioral mode of the universal system of tripling periods in the mechanism of vision, including new data on the so-called advanced series of the universal system of tripling periods observed in the color vision of birds.

Keywords: discrete frequency spectrum, period-tripling cycle, period doubling, universal period-tripling system, human vision, bird vision, Planck scale, Sierpinsky triangle, mathematical model, stochastics, mutations, duplicator, triplicator.

* Работа выполнена по госзаданию ИЭТБ РАН. № госрегистрации 01201351298.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение

Благодаря происходящему в современной науке тотальному уточнению экспериментальных данных о геологических, биологических, астрономических и пр. процессах, достигнуто существенное уточнение и повышение достоверности численных значений старых данных, и на этом основании появилась возможность показать, что заметная часть периодических процессов происходит в своеобразном сквозном мета-резонансе, демонстрируя утроение периодов. Система утраивающихся периодов различных процессов занимает широчайший диапазон масштабов и поэтому она не связана с природой конкретных периодических процессов. Это универсальное (*universe* – вселенная) явление выглядит поистине вселенским, потому что данные по внеземным периодическим процессам, таким как образование квазаров или звездообразование демонстрируют функционально связанную периодичность с такими периодическими земными явлениями как, например, вулканизм, вымирание таксонов, а также множество процессов существенно меньших масштабов. В совокупности это т.н. универсальная система утраивающихся периодов (УСУП).

Согласно работам одного из первооткрывателей феномена УСУП [1-8] – С. Петца (Stephen Joseph Puetz) и его соавторов [9-14], значение $T_{k;m}$ задается формулой

$$T_{k;m}/T_0 = 3^k/2^m.$$

Здесь период $T_0=114.6$ лет, параметр $m=0, 1, 2, \dots$, а целочисленный параметр k , как потом стало ясно из наших работ, принимает значения в интервале приблизительно от -110 до +17. (См. [1, 2, 11]).

Материала, накопленного по теме УСУП, уже достаточно для того, чтобы формулировать первые обоснованные гипотезы и строить модели на эту тему. На *рисунке 1* приведены серии обнаруженных периодов УСУП при $m=0$ и 1. Это: *a* – область периодов $T_{k;m}$ «темпорального фрактала» Петца [12], ограниченная сверху космологическим масштабом времени, а снизу приблизительно 60 годами; *b* – область экспериментально найденных около 40 лет назад периодов колебаний эффективности памяти человека [13]; и серия недавно найденных в нашей лаборатории областей более коротких периодов УСУП [1, 6, 2], а именно: *c* – периоды УСУП, выявленные при исследовании слуха человека; *d* – периоды УСУП, используемые в УВЧ-физиотерапии; *e* – периоды, к которым тяготеют тактовые частоты современных компьютерных процессоров; *f* – период УСУП, на который настроено сумеречное (палочковое) зрение человека.

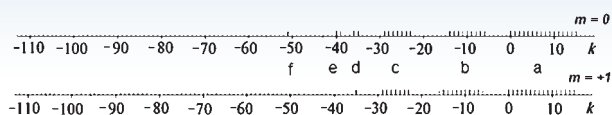


Рис. 1. Найденные для $m=0$ и 1 области периодов УСУП. В пионерской работе [12] периоду 114.6 лет, попавшему в особенно представительную серию с параметром $m=0$, было присвоено нулевое значение параметра k , т.е. $T_{0,0}=114.6$ лет, а гомологичная серия с параметром $m=1$ начинается с $T_{0,1}=57.3$ года, т.е. в логарифмическом масштабе значения периодов на нижней шкале смещены влево; они вдвое меньше периодов, попавших на верхнюю шкалу. В этой статье мы показываем существование еще и опережающих шкал. На усовершенствованном *рисунке 1* они располагались бы выше шкалы $m=0$

Таким образом, в наших работах, начатых в заключительной фазе пионерского этапа исследований С. Петца [14, 15] и С. Петца с соавторами [16], были описаны фрагменты УСУП в области существенно меньших периодов (т.е. меньших k), чем исходные периоды УСУП астрономических масштабов, выявленные группой С. Петца.

На основании сводки данных, приведенной на *рисунке 1*, мы пришли к гипотезе [11], что периоды $T_{k;m}$, принадлежащие УСУП, продолжают в высокочастотную область вплоть до окрестности масштаба времени $\sim 10^{-43}$ секунды, т.е. до планковского масштаба. Поскольку согласно исследованиям группы С. Петца периоды УСУП в астрономических масштабах времени простираются за миллиард лет, то есть, фактически ограничены обозримой вселенной, а в планковском масштабе место времени и пространства занимает уже т.н. пространственно-временная пена, то можно предполагать, что УСУП протянулась сквозь все масштабы времени.

Надо отметить, что в границах, определенных для каждого конкретного прибора, способного регистрировать периоды, в линейном масштабе времени реально помещается лишь несколько периодов, принадлежащих УСУП. И действительно, сигнал считается широкополосным, если ширина его спектра сравнима с центральной частотой. Нередко используется коэффициент 1/10, т.е. если ширина спектра составляет около 1/10 от частоты, на которой передается сигнал, то сигнал считается уже широкополосным. Ясно, что десятая часть – это всего лишь пара утроений. Таким образом, даже при использовании достаточно широкополосных приборов особенный смысл периодов УСУП, вполне может остаться незамеченным.

Надежное обнаружение УСУП задержалось вплоть до недавнего времени еще и потому, что исследователям УСУП нужно было, во-первых,

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

дождаться существенного накопления достаточно точно измеренных периодов, а во-вторых, осознать исключительную роль второго, логарифмического масштаба для времени [14, 17]. Последнее даже несколько странно, т.к. при описании периодических, а часто и не периодических процессов время нередко встречается именно в показателе (т.е. в логарифме) экспоненты. Например, рост капитала K в момент времени t в простейшем случае описывается формулой $K(t) = K(0) * e^t$; здесь t – безразмерное время.

В серии работ [1-8, 11, 18] описаны этапы нашего пути к формулируемой сейчас гипотезе. Она состоит в том, что перспективной математической моделью УСУП является треугольник Серпинского (ТС). В рамках этой модели мы, в частности, получим, что в формуле С. Петца величина 3^k описывает последовательные этапы увеличения размера фрактала периодов. При выборе алгоритма построения ТС мы исходили из того, что его топологическая (евклидова) размерность равна единице, т.е. это линия. При обычном рекуррентном алгоритме построения ТС как удлиняющегося кусочно-ломанного линейного отрезка (см. рисунок 2) его габариты быстро определяются, и лишь его структура последовательно истончается и уточняется. Длина возникающей сложно запутанной линии, формирующей этот объект, увеличивается по показательному закону $(3/2)^k$.



Рис. 2. Рекуррентная геометрическая процедура формирования треугольника Серпинского. Каждый акт приводит к увеличению длины линии в полтора раза. Габариты ТС оказываются ограниченными

В рамках модели УСУП, с каждым очередным утроением периода не математического, а реального, физического треугольника Серпинского, описывающего увеличивающийся период, габариты должны не сохраняться, а расти, покрывая растущие в ходе развития вселенной размеры УСУП. В УСУП как в физическом аналоге математического треугольника Серпинского, длина (т.е. длительность, т.к. речь в модели идет о периодах) каждого фрагмента тоже увеличивалась бы всего лишь в 1,5 раза. Поэтому для того, чтобы увеличение стало троекратным как в УСУП, в каждый стереотипный цикл этой модели был

введен дополнительный этап – этап удвоения габаритов. В каждом цикле утроения периода (т.е. при возрастании параметра k на единицу), теперь последовательно выполняются два этапа (рисунок 3).

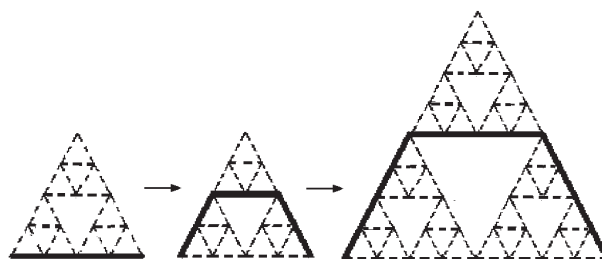


Рис. 3. Двухэтапная (утроение, затем увеличение линейных размеров вдвое) структура цикла утроения периода в модели УСУП, подготавливающая условие автоматического повторения этого цикла

Это нововведение превращает коэффициент удлинения $3/2$ в нужную тройку, а также возвращает длины каждого из трех финальных отрезков цикла к той величине, которая была до утроения. Мы подразумеваем при этом, что действующая в планковском масштабе причина, вызвавшая утроение стартового отрезка (рисунок 3), подействует на финальные отрезки точно таким же образом, как и на исходный. Таким образом, утроения будут повторяться и повторяться.

На первом этапе каждого цикла будет происходить утроение количества элементов, сопровождающееся увеличением общей длины в полтора раза, и затем на втором этапе этого же цикла утроения будет происходить удвоение длины отрезков, а, значит, и общей длины. Итогом цикла окажется утроенное количество элементов, каждый из которых совпадает по размеру с исходным. Это соответствует увеличению длины (длительности) периода втрое. Гипотетическое устройство, утраивающее периоды, можно было бы назвать катализатором или самовоспроизводящимся автоматом, но его суть лучше выражает другое слово: трипликатор. Это неологизм. В конце каждого цикла работы трипликатора возникает возможность начала следующего цикла, провоцирующая уже следующий цикл и т.д.

Как видно из рисунка 2, у обычного математического ТС внешние габариты быстро определяются и не выходят за некоторые рамки, а размер минимального прямолинейного участка стремится к нулю. В модели трипликатора, который, как мы предполагаем, может лежать в основе УСУП, стабильный размер (длительность) минимального прямолинейного участка ТС определяется в планковском масштабе, а габариты ТС с ростом параметра k ТС экспоненциально растут.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Для того, чтобы такая структура (по сути, она должна выглядеть упорядоченно упакованной по мотиву треугольника Серпинского), привела бы к серии наблюдаемых утраивающихся периодов, достаточно допустить, что в планковском масштабе спонтанно возникает достаточно много таких трипликаторов, и что процесс работы каждого трипликатора после какого-то количества циклов так же спонтанно прерывается, т.е. следующий цикл синхронного воспроизведения ТС с этого момента уже не происходит. Это стохастическое явление. Если к моменту остановки процедуры утроений было выполнено k циклов утроения, то возникнет период длительностью $3k$ планковских периодов. Остановки работы множества независимых друг от друга трипликаторов после завершения различного количества циклов k сформируют в совокупности множество периодов, опосредованно наблюдаемое как УСУП.

В биологии клетки мы имеем дело с аналогичным размножением, но не триплетами, а дихотомически: ..., удвоение количества клеток, удвоение биомассы каждой дочерней клетки, удвоение количества, удвоение биомассы и т.д. Это работа дубликатора. В случае внезапной остановки роста такой биологической т.н. синхронной культуры количество клеток после k поколений составляет $2k$. Источники энергии физического трипликатора и биологического дубликатора – двух сравниваемых процессов, сильно отличающихся по природе, – тоже значительно отличаются. Триплетный механизм размножения подпитывается с планковского уровня, где ввиду скоротечности планковского времени принцип неопределенности позволяет заимствовать вполне макроскопическое количество энергии; для сравнения: это энергия взрыва 500 кг тротила. Корни процесса этого утроения могут лежать в области теории автоматов [19] и доминирующей в планковском масштабе сейчас еще слабо представимой теории квантовой гравитации.

Представленная модель последовательных циклов утроения периода приводит к серии периодов УСУП с $m=0$; см. верхнюю шкалу на рисунке 1. Для дальнейшего приближения модели к реально наблюдаемой УСУП, содержащей множество серий с различными m , нужно в рамках сформулированной модели определить, по какой причине в формулу Петца входит еще и деление периода на 2^m .

Результаты и обсуждение

Оказывается, процесс деления периода на 2^m уже фактически заложен в модель. В формуле Петца величина 2^m при положительном параме-

тре m определяет 2^m -кратное отставание значений периодов минорных серий УСУП от главной серии – от той, у которой параметр m равен нулю. В частности, отставание вдвое (см. нижнюю шкалу на рисунке 1) возникнет, если в начавшейся в планковском масштабе истории шкалы $m=1$ в ходе какого-то одного из циклов утроения будет случайно пропущен этап удвоения длины (длительности) периода (см. нижнюю часть рисунка 4). Это стохастическое явление. Описанный выше механизм возникновения множества физических (квазибиологических) синхронных культур с резкими прекращениями размножения будет после спонтанно случившейся мутации вплоть до остановки трипликатора плодить постмутантные периоды вдвое меньшего размера, и в итоге работы множества таких трипликаторов возникнет вся наблюдаемая серия УСУП с $m=1$.

В результате мутации уменьшения периода начнет формироваться серия УСУП, период которой с момента мутации будет все время оказываться вдвое меньше периода не мутировавшей серии. В эксперименте наблюдаются мутантные случаи в основном именно этого типа (нижняя шкала на рисунке 1). Вторая, третья и т.д. мутации приведут к появлению следующих «мутантных» серий УСУП с $m=2,3,\dots$, но вероятность их наблюдения уже соответственно меньше. Тем

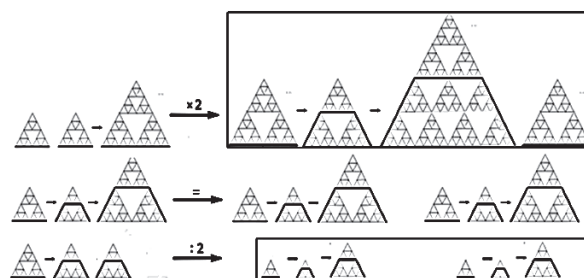


Рис. 4. Двухэтапный цикл утроения периода далеко не идеален: нередко он происходит с мутациями – ошибками в форме пропуска первого и/или второго этапа цикла, что в каждом трипликаторе ведет к возникновению серии УСУП со своим m . На рисунке схематически изображены три варианта работы модели такого стохастического («разболтанного») трипликатора. Средний ряд рисунка изображает одинаковые утроения в отсутствие мутаций. Нижний ряд включает случай утроения периода с пропуском этапа удвоения габаритов в одном из циклов, в результате чего период уменьшается вдвое; верхний ряд – то же при пропуске этапа утроения, в этом случае период увеличивается лишь вдвое. То, что результаты изучения этой сначала спонтанно возникающего и затем спонтанно останавливающегося/исчезающего трипликатора потребовали еще и введения ошибок в процесс его работы, является хорошим доводом в пользу естественности этой стохастической модели

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

не менее, при исследовании проявлений УСУП в механизме зрения человека мы обнаружили даже 11-ю серию УСУП (см. *рисунок 5*), т.е. существуют, в частности, серии, в истории которых уже произошло 11 мутаций, каждая из которых вдвое укоротила процесс утроения периода УСУП.

В работах [11, 18] мы показали, что максимумы спектров поглощения света различных длин волн в различных фоточувствительных клетках глаза человека соответствуют узлам сети Петца $\lambda(T_{k,m})$ (*рисунок 5*). Из этого рисунка, в частности, видно, что в случае зрения человека параметр m всегда положителен.

Со временем, однако, у нас стали накапливаться данные о том, что параметр m может быть в некоторых явлениях не только положительным, но и отрицательным. Ситуация $m < 0$ отличается от немутационной нормы $m = 0$, т.е. от такой ситуации, когда удвоение габарита ТС (см. правую часть *рисуника 3*) обязательно следует после каждого обязательно происходящего утроения периода УСУП (см. центральную часть *рисуника 3*).

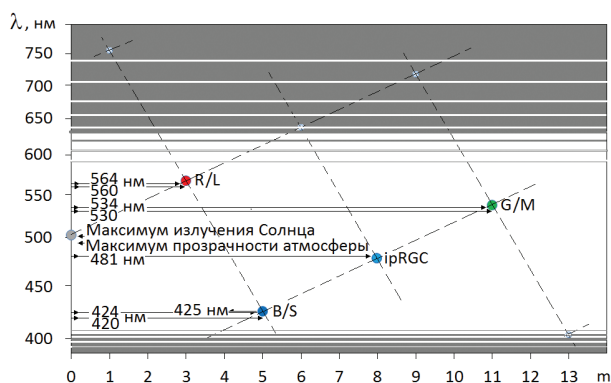


Рис. 5. Соответствие узлам сети Петца максимумов спектров всех фотопигментов глаза человека. Значению при $m=0$ отвечает родопсин палочек и сумеречное зрение, значениям $m=3, 5$ и 11 – красный, синий и зеленый иодопсины колбочек и трихроматное зрение, а значению $m=8$ отвечает меланопсин фоточувствительных нервных клеток сетчатки, ответственный, как известно, за биоритм сна и бодрствования. Близкорасположенные параллельные стрелки на рисунке иллюстрируют незначительность погрешностей средних значений этих максимумов при усреднении нескольких различающихся наборов экспериментальных значений

Отличается это и от ситуации $m > 0$, вызванной пропуском удвоения габарита ТС (см. нижнюю часть *рисуника 4*). Мы предполагаем, что отрицательное m (см. верхний ряд на *рисунике 4*) возникает при «мутации» в форме пропуска этапа утроения периода УСУП (см. левую половину *рисуника 3*), когда при этом этап удвоения (см.

правую половину *рисуника 3*) по-прежнему выполняется. В результате возникает серия периодов УСУП, вдвое опережающая главную, немутантную серию периодов УСУП. Это будет серия с $m=-1$. Серии с $m=-2, -3$ и т.д. возникнут при повторениях этой мутации в каких-то следующих циклах работы стохастического трипликатора.

Убедительный пример периода УСУП с отрицательным параметром m получен нами при исследовании зрения птиц.

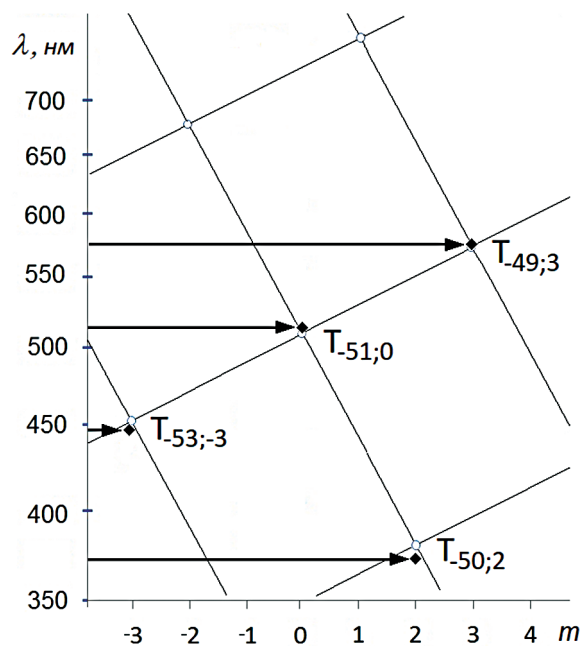


Рис. 6. Соответствие максимумов фоточувствительности всех четырех фотопигментов тетрахромного зрения птиц узлам сети Петца. Обращает на себя внимание узел Петца, расположенный в отрицательной области параметра m (при $m=-3$). Он соответствует опережающей серии утраивающихся периодов, входящей в состав УСУП

Вполне естественно, что ситуация, приведшая к обнаружению УСУП в зрении человека (*рисунок 5*), поставила перед нами вопрос о том, как обстоят дела в случае зрения не человека, а животных. Очевидно, что поскольку человек – это всего лишь один из представителей животного мира, ответ должен быть тем же или практически тем же. Так и оказалось: на *рисунике 6* видно, что максимумы спектров поглощения света различных длин волн в различных типах фоточувствительных клеток глаз животных действительно соответствуют узлам сети Петца $\lambda(T_{k,m})$, однако набор узлов уже не совсем тот, что у человека. Мы показали это на частном примере «средней птицы», взяв необходимые средние значения из широко известного обстоятельного обзора [20] (животные других классов еще в этом смысле

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нами еще не исследованы).

Не помеченный на рисунке узел, соответствующий палочковому зрению, оказался у птиц тем же, что и у людей ($\lambda=504$ нм, $m=0$). Его положение почти совпадает с максимумом спектра поглощения того фотопигмента колбочек глаза птицы, который соответствует серии УСУП с $m=0$.

Сопоставление рисунков 5 и 6 позволяет также поставить вопросы о частоте света и об узле сети Петца, отвечающих фоточувствительным нервным клеткам сетчатки птиц. Сравнение с аналогичными клетками глаза человека позволяет предположить, что это может быть узел при $\lambda=450$ нм и $m=-3$.

Таким образом, возможность наблюдения серий УСУП с отрицательным параметром m формулы Петца подтверждена на частном примере серии УСУП с $m=-3$.

Поскольку отсюда сразу следует, что в одной серии утроений периода могут встретиться мутации, приводящие к противоположным изменениям параметра m , то наблюдение следа, например, 11 уполовинивающих мутаций может оказаться итоговым результатом некоторого числа частично скомпенсировавших друг друга мутаций удвоения и уполовинивания периода с преимуществом уполовинивающих в 11 мутаций. Этот частный пример показывает, что доминирование серии УСУП с $m=0$ может в какой-то мере оказаться следствием взаимной компенсации мутаций удвоения и уполовинивания периодов. Поскольку, однако, доминирует не одна серия с $m=0$, а фактически две серии УСУП: с $m=0$ и с $m=1$, то симметрия положительных и отрицательных m несколько нарушена. А именно, вероятность мутации уполовинивания периодов, по-видимому, несколько больше вероятности мутации удвоения периода, и после компенсации следствий разнонаправленных мутаций возникает особенная, несколько асимметричная выделенность серий УСУП с $m=0$ и с $m=1$. Отметим, что в модели стохастического трипликатора отличие вероятностей сбоев работы различных этапов трипликатора вполне естественна; если бы было наоборот, т.е. если бы вероятности совпадали, это то совпадение пришлось бы объяснять введением в модель трипликатора каких-то дополнительных предположений.

Существование отрицательных m является одним из аргументов в пользу представленного здесь модельного описания мутантного происхождения серий УСУП с $m \neq 0$. Другие имеющиеся у нас примеры, соответствующие накопленным нами к настоящему моменту случаям с отрицательными значениями m , относятся уже не к

области зрения человека и животных. Они будут описаны в специальной статье.

Выводы

Продолжая исследование универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП), мы проиллюстрировали наличие отрицательного параметра m формулы Петца на примере зрения птиц. Согласно развиваемой нами модели УСУП, отрицательные значения m и соответствующие им опережающие серии утраивающихся периодов появляются вследствие т.н. мутаций пропуска этапа утроения в циклах утроения периода УСУП. Каждая такая мутация приводит лишь к удвоению периода. Случай $m=-3$ в примере, связывающем зрение птиц и периоды УСУП, отвечает накоплению в истории этой серии УСУП трех таких мутаций.

Литература

1. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика. 2015, №60(6), С.1208-1215.
2. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика. 2016, №61(3), С.615-624.
3. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н.О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39), С.8-11.
4. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40), С.55-58.
5. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Коломбет В.А. Особенность проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевидении и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики. 2016. №4(42). С. 34-40.
6. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Сквуляк А.Н., Коломбет В.А., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ терапии // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.70-73.
7. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Пица как новый путь

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

к повышению эффективности распознавания целей // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.37-39.

8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РЛС. // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С.18-21.

9. Puetz S.J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events // Chaos, Solitons and Fractals. 81 (2015) 246–270.

10. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory // Journal of Statistical Planning and Inference DOI: 10.1016/j.jspi.2015.10.006 October 2015.

11. Коломбет В.А., Лесных В.Н. Универсальная система утраивающихся периодов как возможный индикатор дробления времени, сопровождающего эволюцию Вселенной // Материалы конференции «Физика пространства и времени». Муром, Премиловы горы, 23-28 марта 2017. С.17-20.

12. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Borchardt Glenn, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractals. 2014, 62-63, P. 55–75.

13. Бондарь А.Т. О закономерностях воспроизведения памятного следа во времени // ДАН СССР, 1977. 236. № 6. С. 1503.

14. Puetz, S.J., The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth. (2009) Outskirts Press, Denver, Colorado; ISBN: 978-1-4327-1216-7.

15. Puetz, S.J. Unified Cycle Theory: Introduction & Data. (2010) Proceedings of the NPA, Long Beach 2010 Annual Conference.

16. Prokoph A., Puetz S. J. Period-Tripling and Fractal Features in Multi-Billion Year Geological Records Mathematical geosciences DOI: 10.1007/s11004-015-9593-y April 2015.

17. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators // Progress in physics 2009, iss. 2, P. 72-76.

18. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Станкевич А.А., Milian-Sanchez V. Наблюдение «музыки сфер» во всей области, заключенной между планковским и космологическим масштабами времени. В сб.: Система «Планета Земля». М.: ЛЕНАРД, 2018. С. 146-161.

19. Фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971. 326 с.

20. Goldsmith T. What birds see? Scientific American. 295, 68 - 75 (2006). doi :10.1038/scientificamerican0706-68.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

SU(2) – КУБИТ–КУТРИТОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ NV–ЦЕНТРАМИ В АЛМАЗЕ

SU(2) – QUBIT–QUTRIT MANAGEMENT OF NV–CENTERS IN DIAMOND

Геннадий Германович Волков

доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
ФГБУ Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П. Константинова
Адрес: 188300, Ленинградская обл.,
г. Гатчина, Орлова роща, д. 1
Тел.: +7(813)714-60-25
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Николай Сергеевич Кукин

кандидат технических наук
начальник лаборатории
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: n.s.kukin@mail.ru

Ирина Олеговна Корчевая

студентка магистратуры
Московский авиационный институт
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Анна Руслановна Мурадова

студентка магистратуры
Московский авиационный институт
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Инна Александровна Мартынова

аспирант
МФТИ (ГУ)
младший научный сотрудник
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики» им. Н.Л.Духова
Адрес: 119017, г. Москва, ул. Большая Ордынка, д.24
Тел.: +7(965)379-00-63

Аннотация

Мы изучаем основы-методы управления спиновыми состояниями кубитов и кутритов в НВЦ через их геометрические представления, без которых невозможно строить чистые смешанные состояния и тем более исследовать класс запутанных состояний. Так, геометрия квантовых чистых и смешанных состояний кубита, связана с трансформацией трехмерной сферы на сферу или шар Блоха. Динамика для первого случая решается в виде двухуровневых уравнений Шредингера для чистых состояний, а для второго случая смешанных состояний необходимо вводить матрицу плотности, временная эволюция которой также задается соответствующими дифференциальными уравнениями. Геометрия кутритных состояний связана с более высокими размерностями, и вопросы управления ими будут обсуждены во второй части статьи, то есть в следующей публикации.

Ключевые слова: NV-центр, спин, электрон, теория групп, кубит, кутрит, сфера Блоха, отображение.

Summary

We study the basis-methods for controlling the spin states of qubits and qutrits in NECs through their geometric representations, without which it is not possible to construct mixed states for cleavage, and even more so to study the class of entangled states. Thus, the geometry of quantum pure and mixed qubit states is related to the transformation of a three-dimensional sphere onto a Bloch sphere or a ball. The dynamics for the first case is solved in the form of two-level Schrödinger equations for pure states, and for the second case of mixed states, it is necessary to introduce a density matrix whose time evolution is also given by the corresponding differential equations. The geometry of the state-of-the-art states is associated with higher dimensions, and the management issues will be discussed in the second part of this article, that is, in the next publication.

Keywords: NV-center, spin, electron, group theory, qubit, qutrit, Bloch sphere, mapping.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение. Геометрия спиновой структуры квантовых систем в микромире о дальнейшем расширении сферы применимости специальной теории относительности

Открытие спиновой структуры электрона, протона, альфа-частиц и всего огромного класса электромагнитных заряженных частиц позволило расширить основы Специальной Теории относительности [1-4], первоначальное понимание которой было основано на заключительном этапе многовекового исследования: с одной стороны – электрических и магнитных свойств вещества, и с другой стороны – волновой природы света, что окончательно было сформулировано в пространственно-временных уравнениях Максвелла, объединяющих все эти три природных явления в единую электромагнитную теорию света. Неожиданностью следствий этой единой теории физических явлений материи, вещества и электромагнитного излучения, стало новое понимание геометрии окружающего мира, которое выразилось в удивительной связи между тремя пространственными (x_1, x_2, x_3) и одним временным $x_0 = ict$ координатными параметрами в описании движения тел, основанном на идее абсолютизма скорости света структуры электромагнитного вакуума видимой вселенной. Эта связь математически выражается в виде инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований группы симметрии Лоренца $SO(1,3)$, действующей в пространственно-временном континууме $R^{(1,3)}$. Однако открытие спина в 20-х годах прошлого столетия, нового внутреннего свойства материи Вселенной, кроме уже известного с исторических времен электрического заряда, оказалось связано с новой внутренней симметрией, которая была сформулирована на языке группы $SU(2)$, открытой Гамильтоном в теории комплексных чисел-кватернионов в конце 19 века. Неприводимые унитарные представления группы $SU(2)$ дали возможность проклассифицировать материю и, в частности, бозоны и фермионы, и отделить материю-вещество ($s=1/2$) от материи-излучения ($s=1$). Возникли вопросы: Какие виды материи не противоречиво могут существовать в этой геометрии? Все ли виды материи Вселенной могут быть описаны унитарными представлениями группы $SU(2)$ [5, 6]?

Действительно, открытие Дираком Лоренц-инвариантного уравнения электрона показало, что группа внутренних симметрий $SU(2)$ должна быть расширена до группы симметрий $SL(2, C) \approx SU(2) \times SU(2)$, что расширило класс фундаментальной материи, дополняя его анти-материей.

Как группа внутренних симметрий $SL(2, C)$

связана с геометрией пространства-времени специальной теории относительности $\beta \in R(1,3)$ и его симметрией группой $SO(1,3)$ которая имеет сингулярность при $\beta = \frac{v}{c} \rightarrow 1, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \rightarrow \infty$?

Возможные решения этих вопросов связаны с тем обстоятельством, что группы внутренних симметрий $SU(2)$ и $SL(2, C)$ тесно связаны с соответствующими группами нерелятивистской теории относительности $SO(3)$ и релятивистской специальной теории относительности $SO(1,3)$, то есть как дважды накрывающие группы:

$$SO(3) \cong SU(2)/Z^2, SO(1,3) \cong SL(2, C)/Z^2.$$

В результате, можно сказать, что без открытия внутренней симметрии материи, описываемой унитарными представлениями группы $SL(2, C)$ специальная теория относительности и ее связи с симметрией группы Лоренца $SO(1,3)$ (группой Пуанкаре) была не полной.

Из всего сказанного следует, что пути расширения нашего мировоззрения окружающего нас пространственно-временного континуума Вселенной и новых явлений в физике микромира связаны с поисками новых особенностей и явлений того класса фундаментальных квантовых систем, которые не принадлежат унитарным представлениям группы $SL(2, C) \approx SU(2) \times SU(2)$. В квантовой теории такие системы уже наблюдаются, и именно с ними связаны еще не решенные проблемы и вопросы. К ним можно отнести проблемы геометрического начала 3-х цветовых кварков и, соответственно, конфайнмента цвета внутри адронов, и образования трех кварк-лептонных поколений, по-новому взглянуть на исследования пространственно-временных волновых свойства три-нейтрино [3-6].

Фактически, в широчайшем диапазоне состояний от нанометров до фермиметров, квантовая теория столкнулась с изучением квантовых состояний систем, структура которых постепенно расширяется от двухуровневых до трех- и более сложных, а также с вопросами их геометрического начала, которое непосредственно связано с прогрессом в дальнейшем углублении основ специальной теории относительности. В работе последовательно проделан путь от двухуровневых квантовых систем к трехуровневым, от кубитов к кутритам и прослеживается, как нетривиально изменится динамика такого перехода. Этот переход рассмотрен как на примерах чистых квантовых состояний, так и на примере смешанных состояний, для которых используется аппарат матриц плотности. В первой части работы рассмотрено как S^3 -геометрия $SU(2)$ -кубита двулистно $SU(2)/Z^2 \cong SO(1,3)$ отображается на двумерную сферу $S^2 = CP^1: S^1 \rightarrow S^3 \rightarrow S^2$. Во второй части будет рассмотрена более сложная

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

задача изучения многомерной S^5 -геометрии для $SU(2)$ -кутриты как для чистых, так и смешанных состояний. В этом случае для такого анализа потребуется обращение к более высоким $SU(3)$ -унитарным или к другим экзотическим симметриям [6-11].

$SU(2)$ -кубит-кутритовая структура NV -центров в создании квантовых сетей и нелокального запутывания

Удивительные особенности квантовых измерений и квантового запутывания открывают огромные перспективы для практического использования достижений квантовой физики в создании квантовых сетей, квантовых компьютеров и прорыва в атомной биологии и медицине [12-16]. Спустя столько прошедших лет квантовая запутанность по-прежнему остается интересным объектом, как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения. В настоящее время ведутся интенсивные поиски возможных практических применений квантовых запутанных состояний, включая квантовые вычисления и квантовую телепортацию.

Известно, что в классической и квантовой механике понятие чистых состояний связано с их полной определенностью в теории. Так, если в классической механике чистое состояние представляется точкой в фазовом пространстве, то уже в квантовой механике это состояние есть вектор (функция) в комплексном векторном пространстве. Стоит отметить, что в квантовой механике вводятся как физико-геометрическое расширение понятия состояния: от частицы-точки к многомерному объекту, описываемой вектором (волновой функцией), так и математическое расширение, связанное с теорией комплексных чисел и их философским началом.

Одна из самых ярких отличительных особенностей квантовой механики от классической касается описания композитных систем. Так для композитной системы, которую можно было бы считать чистым состоянием, составляющие части этой системы могут уже не являться чистыми. Такие состояния принято называть запутанными или переплетенными. Понятие запутанности для смешанных квантовых состояний можно определять как невозможность представить это смешанное состояние как смесь незапутанных чистых состояний. Дополнительной особенностью понятия запутанности является ее нелокальность, что вызывало огромные обсуждения при зарождении квантовой механики, и которые выражаются постоянным интересом экспериментальных проверок неравенств Белла в пространственно-временной динамике

для совершенно различных по природе двух-частичных смешанных квантовых состояний.

Часто предполагается, что квантовая запутанность подразумевает существование чистых запутанных состояний, которые создают неклассические явления. Однако в лаборатории можно иметь дело со смешанными состояниями, а не чистыми, что может быть связано с неконтролируемым взаимодействием с окружающей средой. Тогда очень важно знать, какие смешанные состояния могут производить квантовые эффекты, и проблема может оказаться гораздо сложнее, чем в случае с чистыми состояниями. Это может быть связано с тем, что смешанные состояния, по-видимому, обладают способностью вести себя классически в некоторых отношениях, но квантово механически в других.

Запутанность является фундаментальным свойством квантовых систем и базовым ресурсом для квантовой информации и вычислений. Однако ее обнаружение и квантификация решаются только в некоторых простых случаях, например, в двухкубитных системах. Нахождение хороших мер перепутывания является связанной нетривиальной задачей даже для следующих простейших возможностей: нечистых двух-частичных состояний в произвольных измерениях или трехкубитных нечистых состояний.

Кроме многокубитовых состояний особую важность представляют и кутриты из трех состояний и их многокутритовые обобщения. Например, это касается состояний со спином 1. В этом случае огромную роль играют представление состояний кутрита [7], в частности чистых состояний. Это операторное представление аналогично известному представлению кубитов состояний Паули или Блоха. Представление применяется к анализу переплетения кутритов, состояния двух кутритов, которые представляют собой смесь максимально смешанного состояния и максимально запутанного состояния. Квантовая сеть может быть построена с использованием запутанности для соединения локальных узлов обработки, каждая из которых содержит регистр хорошо контролируемых и долгоживущих кубитов. Твердые вещества являются привлекательной платформой для таких регистров, поскольку использование нанонаборки и конструкции материалов может позволить хорошо управляемые и масштабируемые системы кубитов.

Первым кандидатом для твердотельного квантового регистра является дефектный отрицательно-заряженный центр азотной вакансии NV (NV) в алмазе. Центр NV в алмазе является одной из наиболее перспективных систем

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

для квантовых вычислений за счет удобных оптических схем инициализации и считывания спинов, что может быть выполнено при комнатной температуре [12-16]. NV-центр представляет долгоживущий электронный уровень ($s=1$) с надежным оптическим интерфейсом, позволяющим осуществлять измерение и управление электронным спин-кубитом с высоким коэффициентом надежности [12-16]. Более того, электронный спин NV можно использовать для эффективного манипулирования с помощью сверхтонкой связи близких ядерных спинов, что обеспечивает средство как для обнаружения, так и для контроля над ними. Для последующего использования сформированного таким образом многокубитового регистра в квантовой сети необходимо создание механизма для последовательного соединения удаленных друг от друга NV-центров [12-16].

Как кубиты, ядерные спины известны своим длительным временем когерентности и изоляции от внешней среды. Недавние эксперименты продемонстрировали инициализацию и считывание ядерных спинов в алмазе с использованием центра NV в качестве вспомогательного кубита [9,10]. Надежное управление ядерными спинами также может быть достигнуто при комнатной температуре со временем когерентности в течение миллисекунд.

Алмаз потенциально может служить исходным материалом для квантовых компьютеров NV-центров на основе кубитов и возможно кутритов.

Для запутывания двух электронных спинов в алмазе, которые достаточно удалены друг от друга расстоянием надо использовать надежный протокол, основанный на локальном создании спин-фотонного перепутывания и последующем совместном измерении фотонов.

SU(2)-кудитовые состояния. Кубитовые чистые состояния

Запутанность в многочастичных связанных системах является важным ресурсом для многих проблем квантовой информатики, но ее количественное значение очень трудная задача из-за различных типов запутывания. Многомерные запутанные состояния интересны как для изучения основ квантовой механики, так и для актуальности разработки новых протоколов для квантовой коммуникации. Использование перепутанных кутритов или кудитов вместо кубитов увеличивает защиту от перехвата. С практической точки зрения ясно, что создание и сохранение запутанности контролируемым образом является основной проблемой для реализации

квантовых компьютеров. Максимально запутанные состояния лучше всего подходят для протоколов квантовой телепортации и квантовой криптографии. Запутанность и симметрия являются основными понятиями квантовой механики. Изучается динамика многочастичных систем, инвариантных при любой подсистемной перестановке. Цель – найти точные решения для динамики связанных друг с другом кубитов (кутритов), взаимодействующих с переменным магнитным полем, а также сравнительный анализ мер сцепления их в цепочке.

$$|q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle \quad (1)$$

или

$$|q\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где α, β – комплексные числа удовлетворяющие условию нормировки

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (3)$$

которое определяет кубит в комплексной плоскости S^1 .

Динамика двухуровневой квантовой системы

Со спином электрона $s=1/2$ ассоциируется магнитный момент

$$\vec{M} = -\frac{1}{\hbar} g\mu_e \vec{S}, \quad (4)$$

где

$$\vec{S} = \frac{\hbar}{2} \vec{\sigma}, \quad \vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) \quad (5)$$

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e} = 5.8 \cdot 10^{-4} eV/T. \quad (6)$$

При рассмотрении движения электрона в магнитном поле (B_x, B_y, B_z), используя спинорное представление SU(2)-спин группы через матрицы Паули:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

можно получить уравнение Шредингера для двухуровневой спинорной системы:

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = \hat{H}\psi = -\vec{M} \cdot \vec{B}\psi = \frac{g\mu_e}{2} \begin{pmatrix} B_z & B_x - iB_y \\ B_x + iB_y & -B_z \end{pmatrix} \psi, \quad (8)$$

Подстановка спинорной волновой функции в уравнение

$$\psi = \psi(t) = \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

дает следующее выражение:

$$i\hbar \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \frac{g\mu_e}{2} \begin{pmatrix} B_z & B_x - iB_y \\ B_x + iB_y & -B_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Пусть магнитное поле будет суперпозицией постоянного магнитного поля $B_0 = B_z$ направленное по оси z и переменного поля направленно-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

го перпендикулярно оси z:

$$B_x = B_1 \cos \omega t, \quad B_y = B_1 \sin \omega t, \quad (11)$$

$$\omega_0 = \frac{g\mu_e}{2\hbar} B_0, \quad \omega_1 = \frac{g\mu_e}{2\hbar} B_1. \quad (12)$$

После ввода обозначений уравнение Шредингера для двухуровневой системы принимает следующий вид:

$$i \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_0 & \omega_1 e^{-i\omega t} \\ \omega_1 e^{i\omega t} & -\omega_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (13)$$

или

$$\dot{\alpha} = -i\omega_0 \alpha - i\omega_1 \beta e^{-i\omega t}, \quad (14)$$

$$\dot{\beta} = i\omega_0 \beta - i\omega_1 \alpha e^{i\omega t}. \quad (15)$$

Для решения системы 2-х дифференциальных уравнений надо задать граничные или начальные значения. Пусть в момент времени $t=0$ электрон находился в нижнем энергетическом состоянии, которое отвечает проекции спина $m_s = -1/2$:

$$\psi(0) = \begin{pmatrix} \alpha(0) \\ \beta(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Вероятность нахождения электрона в верхней позиции в момент времени $t > 0$ задается величиной

$$P^\uparrow = |\alpha(t)|^2. \quad (17)$$

Решение системы 2-х уравнений относительно функции $\alpha(t)$:

$$\ddot{\alpha} = -i\omega_0 \dot{\alpha} - i\omega_1 \dot{\beta} e^{-i\omega t} - \omega \omega_1 \beta e^{-i\omega t}, \quad (18)$$

$$\dot{\alpha} = -i\omega_0 \alpha - i\omega_1 \beta e^{-i\omega t}, \quad (19)$$

$$\beta = \frac{i}{\omega_1} (\dot{\alpha} + i\omega_0 \alpha) e^{i\omega t}, \quad (20)$$

$$\dot{\beta} = i\omega_0 \beta - i\omega_1 \alpha e^{i\omega t}, \quad (21)$$

$$\ddot{\alpha} = -i\omega_0 \dot{\alpha} - i\omega_1 \dot{\alpha} e^{-i\omega t} (i\omega_0 \beta - i\omega_1 \alpha e^{i\omega t}) - \omega_1 \beta e^{-i\omega t}, \quad (22)$$

$$\ddot{\alpha} = -i\omega_0 \dot{\alpha} - \omega_1^2 \alpha + \omega_1 (\omega_0 - \omega) e^{-i\omega t} \beta, \quad (23)$$

$$\ddot{\alpha} = -i\omega_0 \dot{\alpha} - \omega_1^2 \alpha + \omega_1 (\omega_0 - \omega) e^{-i\omega t} \frac{i}{\omega_1} (\dot{\alpha} + i\omega_0 \alpha) e^{i\omega t}, \quad (24)$$

$$\ddot{\alpha} = (-i\omega) \dot{\alpha} - [\omega_1^2 + (\omega_0 - \omega)\omega_0] \alpha, \quad (25)$$

$$\ddot{\alpha} + i\omega \dot{\alpha} + [\omega_1^2 + \omega_0^2 - \omega_0 \omega] \alpha = 0. \quad (26)$$

Метод решения одного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\alpha(t) = e^{ik t}. \quad (27)$$

Соответствующее характеристическое уравнение имеет вид

$$k^2 + \omega k - (\omega_1^2 + \omega_0^2 - \omega_0 \omega) = 0. \quad (28)$$

Корни характеристического уравнения:

$$k_{\pm} = -\frac{\omega}{2} \pm \sqrt{\omega_1^2 + \left(\omega_0 - \frac{\omega}{2}\right)^2}, \quad (29)$$

Общее решение

$$\alpha(t) = p_1 e^{ik_+ t} + p_2 e^{ik_- t}, \quad (30)$$

$$\beta(t) = -\frac{1}{\omega_1} [p_1 (k_+ + \omega_0) e^{k_+ t} + p_2 (k_- + \omega_0) e^{k_- t}] e^{i\omega t}. \quad (31)$$

Константы могут быть определены из начальных условий:

$$\alpha(0) = 0 \rightarrow p_1 = -p_2, \quad (32)$$

$$\beta(0) = 1 \rightarrow 1 = -\frac{1}{\omega_1} [p_1 (k_+ + \omega_0) + p_2 (k_- + \omega_0)], \quad (33)$$

откуда

$$p_1 = \frac{\omega_1}{k_- - k_+}, \quad (34)$$

$$p_2 = \frac{\omega_1}{k_+ - k_-}. \quad (35)$$

С учетом (28), (29) получено

$$\alpha(t) = -\frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \left(\omega_0 - \frac{\omega}{2}\right)^2}} e^{-i\omega t/2} \sin \left(t \sqrt{\omega_1^2 + \left(\omega_0 - \frac{\omega}{2}\right)^2} \right), \quad (36)$$

откуда вероятность нахождения электрона в верхней позиции в момент времени $t > 0$ имеет вид

$$P^\uparrow = |\alpha(t)|^2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \left(\omega_0 - \frac{\omega}{2}\right)^2} \sin^2 \left(t \sqrt{\omega_1^2 + \left(\omega_0 - \frac{\omega}{2}\right)^2} \right). \quad (37)$$

При условии $\omega = 2\omega_0$ вероятность перехода на высший уровень максимальна, то есть $\omega = 2\omega_0$ – условие резонанса двухуровневой квантовой системы.

На основе приведенных расчетов можно получить следующее решение уравнения (7):

$$\psi(t) = \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\omega_1}{k_- - k_+} \right) (e^{ik_+ t} - e^{ik_- t}) \\ \frac{1}{k_+ - k_-} [(k_+ + \omega_0) e^{ik_+ t} - (k_- + \omega_0) e^{ik_- t}] e^{i\omega t} \end{pmatrix} \quad (38)$$

Сфера Блоха

Эволюцию волновой функции (38) можно представить в виде вращения единичного вектора по сфере Блоха. Для описания сферы Блоха целесообразно использовать понятие кубита.

В логическом базисе две степени свободы кубита можно выразить в виде единичного вектора через два угловых параметра \mathcal{G} , φ :

$$|q\rangle = \cos \frac{\mathcal{G}}{2} |0\rangle + \sin \frac{\mathcal{G}}{2} e^{i\varphi} |1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}. \quad (39)$$

На сфере Блоха кубит можно также представить в виде вектора

$$\vec{q} = (\sin \mathcal{G} \cos \varphi, \sin \mathcal{G} \sin \varphi, \cos \mathcal{G}) \quad (40)$$

являющегося представлением группы $SO(3)$.

Вводя вектор Паули $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, кубит можно также представить в $SU(2)$ -матричном виде:

$$\hat{M} = \vec{q} \cdot \vec{\sigma} = \sin \mathcal{G} \cos \varphi \sigma_1 + \sin \mathcal{G} \sin \varphi \sigma_2 + \cos \mathcal{G} \sigma_3, \quad (41)$$

или

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} \cos \mathcal{G} & e^{-i\varphi} \sin \mathcal{G} \\ e^{i\varphi} \sin \mathcal{G} & -\cos \mathcal{G} \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Кубит можно представить в трех формах:

- в форме единичного вектора в комплекс-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ном круге (Гильбертово пространство состояний);

- в форме унитарной бесшпуровой 2×2 -матрицы ($SU(2)$ -представление);

- в форме единичного вектора на сфере Блоха ($O(3)$ -представление).

Все эти формы позволяют понять трансформационные свойства кубитов относительно ряда преобразований, например, унитарных – вращения и фазовые сдвиги, которые сохраняет его норму.

Для иллюстрации можно привести известную формулу Родрига

$$\vec{q}' = \cos \theta \vec{q} + (1 - \cos \theta)(\vec{n} \cdot \vec{q})\vec{n} + \sin \theta \vec{n} \times \vec{q}, \quad (43)$$

которая выражает преобразование кубита относительно вращения на угол θ вокруг оси n .

Отображение $SU(2)$ -кубита на сферу Блоха

Для ортогональной группы $SO(n)$ всегда существует дважды накрывающая $Spin(n)$ группа (хорошо известные примеры – $Spin(3)=SU(2)$, $Spin(4)=SU(2) \times SU(2)$), то есть для каждого элемента группы $SO(n)$ существуют два элемента группы $Spin(n)$, которые топологически односвязанные. Можно построить гомоморфизм Φ , дважды накрывающий группу $SO(n)$:

$$Spin(n) \rightarrow SO(n). \quad (44)$$

Спин группа $Spin(n)$ есть группа Ли той же размерности, что и группа $SO(n)$, локальные свойства которых изоморфны, что означает изоморфизм алгебр Ли:

$$spin(n) \approx so(n). \quad (45)$$

Глобальные свойства групп $Spin(n)$ и $SO(n)$, определяющиеся гомотопическими группами, уже различны. Так фундаментальная группа $SO(n)$ нетривиальная ($n > 2$) $n1(SO(n))=Z2$, что означает, в ее геометрии существуют однократно нестягиваемые замкнутые петли, стягивание которых происходит при двукратном обходе. Так если спин группа $Spin(3)$ есть односвязная трехмерная сфера $Spin(3)=SU(2) \approx S^3$, то группа $SO(3)$ уже является двухсвязным многообразием:

$$SO(3) \approx \frac{S^3}{Z_2} = RP^3. \quad (46)$$

Спинорное представление не есть представление $SO(3)$ (в литературе называют как проективное представление). Дважды накрывающее отображение

$$SU(2) \xrightarrow{\Phi} SO(3) \quad (47)$$

является гомоморфизмом, так что представление $(n, V)SO(3)$ можно построить из представления группы $SU(2)$ следующим образом:

$$\pi : g \in SO(3) \rightarrow \pi(g) = \pi_{spin}(\tilde{g}) \in SU(2), \quad (48)$$

где $\tilde{g} \in SU(2)$ такой, что $\Phi(\tilde{g}) = g$;

π является гомоморфизмом с точностью до знака:

$$\pi(g_1)\pi(g_2) = \pm \pi(g_1 g_2). \quad (49)$$

Далее будет рассмотрено как S^3 -геометрия $SU(2)$ -кубита двулистно $SU(2)/Z_2 \cong SO(3)$ отображается на двумерную сферу $S^2 = CP^1$: $S^1 \rightarrow S^3 \rightarrow S^2$, а также более сложная задача изучения n -мерной S^5 -геометрии для $SU(2)$ -кубита как для чистых, так и для смешанных состояний.

Используемое отображение $SU(2)$ -кубита

$$S^3 \xrightarrow{S^1} S^2 \quad (50)$$

относится в геометрии к главному расслоению, в котором слоем (фибром) является группа $U(1) \cong S^1$, а базой расслоения является фактор-пространство сфера $S^2 \approx SU(2)/U(1)$. Для этого геометрия S^3 представляется как пара комплексных чисел $\{z_1, z_2\} \in C^2$ с условием $|z_1|^2 + |z_2|^2 = 1$. Тогда каждой паре комплексных чисел $\{z_1, z_2\}$ можно сопоставить комплексное число $w = z_1/z_2 \in C$. С условием, $\{z_2 = 0\} \rightarrow w = \infty$ комплексная плоскость C , пополненная точкой на бесконечности, расширяется до $CP^1 = (C + \infty) \sim S^2$.

Так как точки $\{z_1, z_2\}$ и $\{z_1', z_2'\} = \{e^{ia}z_1, e^{ia}z_2\}$ отображаются в одну точку $w \in CP^1$, то слоем является $U(1) \cong S^1$. Для любой точки $P \in S^2$ ее прообраз $f^{-1}(P)$ есть круг $S^1 \in S^3$. Это ассоциируется с тем фактом, что S^3 есть группа Ли единичных кватернионов, которая может быть отождествлена с группой $SU(2)$,

$$S^3/S^1 = SU(2)/U(1) \cong S^2, \quad (51)$$

которая является просто связанной и дважды накрывающей группу $SO(3) \approx S^3/Z_2 \approx RP^3$. Сфера Блоха (Пуанкаре) является комплексным проективным пространством $S^2 = CP^1$.

Можно дать и алгебраический путь отображения $f: S^3 \rightarrow S^2$ высшеммерной сферы

$$S^3 = \{(x_1, x_2, x_3, x_4) \in R^4 : x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = 1\} \quad (52)$$

на низшеммерную сферу

$$S^2 = \{(y_1, y_2, y_3) \in R^3 : y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 = 1\}, \quad (53)$$

где переменные $\{y_1, y_2, y_3\}$ могут быть определены следующим образом:

$$y_1 = 2(x_1 x_3 + x_2 x_4) \quad (54)$$

$$y_2 = 2(x_1 x_3 - x_2 x_4) \quad (55)$$

$$y_3 = (x_1^2 + x_2^2) - (x_3^2 + x_4^2) \quad (56)$$

Так что спинорное представление $Spin(3)=SU(2)$ является только проективным представлением $SO(3)$, не являясь чистым представлением. Спинорное представление является более фундаментальным, чем векторное. Его нельзя получить, зная векторное представление, но зная спинорное представление, можно найти векторное.

$$\hat{x} = \vec{x} \cdot \vec{S} = x_i \cdot S_i = \frac{1}{2} x_i \cdot \sigma_i, \quad (57)$$

$$Det \hat{x} = -(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \quad (58)$$

$$x_i = Sp(\sigma_i \hat{x}) = \frac{1}{2} Sp(\sigma_i \sigma_j) x_j, \quad (59)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$Sp(\sigma_i \sigma_j) = 2\delta_{ij}. \quad (60)$$

Унитарное преобразование

$$\hat{x}' = U\hat{x} \cdot \vec{S}U^+ = (U\vec{S}U^+) \cdot \vec{x}, \quad (61)$$

где

$$U = \begin{pmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{pmatrix}, \quad (62)$$

$$|a|^2 + |b|^2 = 1, \quad (63)$$

$$UU^+ = U^+U = \hat{1}, \quad (64)$$

сохраняет детерминант и, следовательно, квадратичную форму

$$Det\hat{x}' = Det\hat{x}, \quad (65)$$

$$(x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2) = (x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2) \quad (66)$$

То есть унитарное преобразование индуцирует ортогональное преобразование

$$x_i' = Sp(\sigma_i U S_j U^+) x_j = \frac{1}{2} Sp(\sigma_i U \sigma_j U^+) x_j = O_{ij} x_j, \quad (67)$$

$$O_{ij} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_i U \sigma_j U^+), \quad (68)$$

$$O^T O = 1. \quad (69)$$

Проведены следующие вычисления:

$$U\sigma_1 U^+ = \begin{pmatrix} ab^* + ba^* & a^2 - b^2 \\ a^{*2} - b^{*2} & -ab^* - ba^* \end{pmatrix}, \quad (70)$$

$$U\sigma_2 U^+ = i \begin{pmatrix} -ab^* + ba^* & -a^2 - b^2 \\ a^{*2} + b^{*2} & ab^* - ba^* \end{pmatrix}, \quad (71)$$

$$U\sigma_3 U^+ = \begin{pmatrix} |a|^2 - |b|^2 & -2ab \\ -2a^*b^* & -|a|^2 + |b|^2 \end{pmatrix}. \quad (72)$$

$$O_{11} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_1 U \sigma_1 U^+) = \frac{1}{2} Sp \begin{pmatrix} a^{*2} - b^{*2} & -ab^* - ba^* \\ ab^* + ba^* & a^2 - b^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} [a^{*2} + a^2 - b^2 - b^{*2}], \quad (73)$$

$$O_{12} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_1 U \sigma_2 U^+) = \frac{i}{2} Sp \begin{pmatrix} a^{*2} + b^{*2} & ab^* - ba^* \\ -ab^* + ba^* & -a^2 - b^2 \end{pmatrix} = \frac{i}{2} [a^{*2} - a^2 + b^2 - b^{*2}], \quad (74)$$

$$O_{13} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_1 U \sigma_3 U^+) = \frac{1}{2} Sp \begin{pmatrix} -2a^*b^* & -|a|^2 + |b|^2 \\ |a|^2 - |b|^2 & -2ab \end{pmatrix} = -[ab + a^*b^*], \quad (75)$$

$$O_{13} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_1 U \sigma_3 U^+) = \frac{1}{2} Sp \begin{pmatrix} -2a^*b^* & -|a|^2 + |b|^2 \\ |a|^2 - |b|^2 & -2ab \end{pmatrix} = -[ab + a^*b^*], \quad (76)$$

$$O_{22} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_2 U \sigma_2 U^+) = \frac{1}{2} Sp \begin{pmatrix} -a^{*2} - b^{*2} & -ab^* + ba^* \\ -ab^* + ba^* & -a^2 - b^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} [a^{*2} + a^2 + b^2 + b^{*2}], \quad (77)$$

$$O_{23} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_2 U \sigma_3 U^+) = \frac{i}{2} Sp \begin{pmatrix} 2a^*b^* & |a|^2 - |b|^2 \\ |a|^2 - |b|^2 & -2ab \end{pmatrix} = -i[ab - a^*b^*], \quad (78)$$

$$O_{31} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_3 U \sigma_1 U^+) = \frac{1}{2} Sp \begin{pmatrix} ab^* + ba^* & a^2 - b^2 \\ -a^2 + b^2 & ab^* + ba^* \end{pmatrix} = -[ab^* - ba^*], \quad (79)$$

$$O_{32} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_3 U \sigma_2 U^+) = \frac{i}{2} Sp \begin{pmatrix} -ab^* + ba^* & -a^2 - b^2 \\ -a^{*2} + b^{*2} & -ab^* + ba^* \end{pmatrix} = -i[ab^* + ba^*], \quad (80)$$

$$O_{33} = \frac{1}{2} Sp(\sigma_3 U \sigma_3 U^+) = \frac{i}{2} Sp \begin{pmatrix} |a|^2 - |b|^2 & -2ab \\ 2a^*b^* & |a|^2 - |b|^2 \end{pmatrix} = [|a|^2 - |b|^2]. \quad (81)$$

$$O = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(a^{*2} + a^2) - \frac{1}{2}(b^{*2} + b^2) & \frac{i}{2}(a^{*2} - a^2) + \frac{i}{2}(b^{*2} - b^2) & -(ab + a^*b^*) \\ \frac{i}{2}(a^2 - a^{*2}) - \frac{i}{2}(b^2 - b^{*2}) & \frac{1}{2}(a^{*2} + a^2) + \frac{1}{2}(b^{*2} + b^2) & -i(ab - a^*b^*) \\ (ab^* + ba^*) & -i(ab^* - ba^*) & |a|^2 - |b|^2 \end{pmatrix}, \quad (82)$$

$$O \in SO(3): O \cdot O^T = \hat{1}_3. \quad (83)$$

В результате было получено дважды накрывающее отображение

$$\Phi: SU(2) \rightarrow SO(3). \quad (84)$$

Для любой унитарной матрицы $U \in SU(2)$:

$$U = \begin{pmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{pmatrix}: |a|^2 + |b|^2 = 1, a \in C, b \in C \quad (85)$$

строится матрица $O \in SO(3)$:

$$\Phi \begin{pmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}(a^2) - \text{Re}(b^2) & \text{Im}(a^2) + \text{Im}(b^2) & -2\text{Re}(ab) \\ \text{Im}(a^2) - \text{Im}(b^2) & \text{Re}(a^2) + \text{Re}(b^2) & 2\text{Im}(ab) \\ 2\text{Re}(ab^*) & 2\text{Im}(ab^*) & |a|^2 - |b|^2 \end{pmatrix}, \quad (86)$$

Далее проводится проверка условия ортогональности (83). Если принять

$$\begin{cases} a_1 = \text{Re} a \\ a_2 = \text{Im} a \\ b_1 = \text{Re} b \\ b_2 = \text{Im} b \end{cases} \quad (87)$$

то условие (83) имеет вид

$$\begin{cases} O_{11}^2 + O_{12}^2 + O_{13}^2 = 1 \\ O_{21}^2 + O_{22}^2 + O_{23}^2 = 1 \\ O_{31}^2 + O_{32}^2 + O_{33}^2 = 1 \end{cases} \quad (88)$$

Тогда необходимо проверить все условия системы (85):

$$\begin{aligned} O_{11}^2 + O_{12}^2 + O_{13}^2 &= (a_1^2 - a_2^2 - b_1^2 + b_2^2)^2 + 4(a_1 a_2 + b_1 b_2)^2 + 4(a_1 b_1 - a_2 b_2)^2 = \\ &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 - 2a_1^2 a_2^2 - 2a_1^2 b_1^2 + 2a_1^2 b_2^2 + 2a_2^2 b_1^2 - 2a_2^2 b_2^2 - 2b_1^2 b_2^2 + \\ &+ 4a_1 a_2^2 + 4b_1^2 b_2^2 + 8a_1 a_2 b_1 b_2 + 4a_1^2 b_1^2 + 4a_2^2 b_2^2 - 8a_1 b_1 a_2 b_2 = \\ &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 + 2a_1^2 a_2^2 + 2a_1^2 b_1^2 + 2a_1^2 b_2^2 + 2a_2^2 b_1^2 + 2a_2^2 b_2^2 + 2b_1^2 b_2^2 = \\ &= (a_1^2 + a_2^2 + b_1^2 + b_2^2)^2 = 1, \end{aligned} \quad (89)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$\begin{aligned}
 O_{21}^2 + O_{22}^2 + O_{23}^2 &= (a_1^2 - a_2^2 + b_1^2 - b_2^2)^2 + 4(a_1 a_2 - b_1 b_2)^2 + 4(a_1 b_2 + a_2 b_1)^2 = \\
 &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 - 2a_1^2 a_2^2 + 2a_1^2 b_1^2 - 2a_1^2 b_2^2 - 2a_2^2 b_1^2 + 2a_2^2 b_2^2 - 2b_1^2 b_2^2 + \\
 &+ 4a_1^2 a_2^2 + 4b_1^2 b_2^2 - 8a_1 a_2 b_1 b_2 + 4a_1^2 b_2^2 + 4a_2^2 b_1^2 + 8a_1 b_1 a_2 b_2 = \\
 &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 + 2a_1^2 a_2^2 + 2a_1^2 b_1^2 + 2a_1^2 b_2^2 + 2a_2^2 b_1^2 + 2a_2^2 b_2^2 + 2b_1^2 b_2^2 = \\
 &= (a_1^2 + a_2^2 + b_1^2 + b_2^2)^2 = 1, \tag{90}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 O_{31}^2 + O_{32}^2 + O_{33}^2 &= (a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 - b_2^2)^2 + 4(a_1 b_1 + a_2 b_2)^2 + 4(a_2 b_1 - a_1 b_2)^2 = \\
 &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 + 2a_1^2 a_2^2 - 2a_1^2 b_1^2 - 2a_1^2 b_2^2 - 2a_2^2 b_1^2 - 2a_2^2 b_2^2 + 2b_1^2 b_2^2 + \\
 &+ 4a_1^2 b_2^2 + 4a_2^2 b_1^2 - 8a_1 a_2 b_1 b_2 + 4a_1^2 b_1^2 + 4a_2^2 b_2^2 + 8a_1 b_1 a_2 b_2 = \\
 &= a_1^4 + a_2^4 + b_1^4 + b_2^4 + 2a_1^2 a_2^2 + 2a_1^2 b_1^2 + 2a_1^2 b_2^2 + 2a_2^2 b_1^2 + 2a_2^2 b_2^2 + 2b_1^2 b_2^2 = \\
 &= (a_1^2 + a_2^2 + b_1^2 + b_2^2)^2 = 1. \tag{91}
 \end{aligned}$$

Таким образом, было построено отображение (86) $SU(2)$ -кубита на сферу Блоха S^2 .

Заключение

Основные идеи управления двухуровневой квантовой системой заложены в возможностях вращения спина статическими и переменными магнитными полями. Так под действием статических магнитных полей, направленных параллельно оси квантования возникает свободная прецессия и возможно изменение азимутального угла – фаза φ на сфере Блоха. Перпендикулярные к оси квантования осциллирующие магнитные поля влияют на популяцию уровней, а также меняют полярный угол θ на сфере Блоха. К важнейшим контрольным экспериментам относят [13-16]:

- Раби осцилляции, в которых осцилляционно меняется популяция уровней;
- релаксационные эксперименты и, соответственно, измерение времени релаксации T_1 ;
- интерферометрия Рамсея и измерение T_2^* ;
- спин-эхо последовательность: $n/2$ -импульс и один или несколько π -дефазирующие импульсы и измерение T_2^* .

Двухуровневые квантовые системы встречаются в квантовой физике не только в спиновых системах. Огромный интерес к таким системам возник при изучении осцилляций материи – антиматерии, которые происходят в переходах нейтральных мезонов $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0, D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0, B_d^0 \leftrightarrow \bar{B}_d^0, B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$.

Квантовые переходы частиц в анти-частицы также описывается уравнениями Шредингера для двухуровневых систем. Но сама динамика лежит в структуре этих мезонов и обуславливается обменами массивными кварками “charm”, “bottom”, “top”, взаимодействующих через заряженные калибровочные бозоны W^\pm . Изучение осцилляций $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ позволило корректно предсказать массу очарованного кварка “charm”, что дало начало эпохе великих открытий в фи-

зике массивных кварков и лептонов. Так, после этого открытия были изучены и механизмы смешивания $D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0, B_d^0 \leftrightarrow \bar{B}_d^0, B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$, которые предсказали массу “top”-кварка, что было подтверждено в ближайших экспериментах на протонных ускорителях [19].

В последнее время привлекло огромное внимание исследование трехуровневых квантовых систем. Так в физике высоких энергий огромный интерес связан с проблемой конфайнмента «3-цвета» в адронах и исследованием природы нейтринных осцилляций трех видов [3,4,6,7]. В квантовой информации при исследовании возможностей контроля над кубитами мы также сталкиваемся с трехуровневыми системами.

Можно предполагать, что d -мерные квантовые чистые состояния могут взаимно-однозначно соответствовать точкам в проективном пространстве $CP^{(d-1)}$, прежде всего это можно проиллюстрировать на примере квантовых систем со спином $s=1/2$.

Каждое чистое состояние спин-системы соответствует единственному направлению в физическом пространстве. Следовательно, оно может быть описано точкой на единичной сфере как поверхности представляющей все направления в трех измерениях: $S^2=CP^1$.

Противоположные точки на этой сфере (сфера Блоха) ассоциируются с ортогональными состояниями, и выпуклые смеси чистых состояний представлены точками внутри этой сферы, то есть они соответствуют пространству оператору плотности для системы с $s=1/2$. Таким образом шар Блоха соответствует всем состояниям пространства оператора плотности. Так как ортогональные состояния идут парами, спин-система $s=1/2$ является примером двухуровневой квантовой системы. Любая двухуровневая квантовая система будет иметь состояния представленные шаром Блоха (Пуанкаре), которые называются кубитами. Матрица плотности для них строится следующим образом:

$$\rho = \frac{1}{2}(\hat{1} + \vec{n} \cdot \vec{\sigma}), \|\rho\| \leq 1, \tag{92}$$

где единичный вектор для чистых состояний \vec{n} принадлежит сфере Блоха $S^2=CP^1$.

Собственные значения оператора плотности:

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 \pm |\vec{n}|), |\vec{n}| \leq 1. \tag{93}$$

Эти примеры показывают, что вопросы квантовой физики пересекаются в огромном диапазоне расстояний микромира. Многие вопросы квантовой физики до сих пор остаются открытыми и требуют дальнейших исследований. Один из вопросов связан с возможностями углубления основ квантовой физики на основе расширения

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

теории комплексных чисел и соответствующего операторного формализма [1-7]. В данной статье поставлена цель проанализировать основные тонкости и достижения в двух уровнях квантовых систем, более подробно останавливаясь на чистых состояниях. В следующей публикации планируется перейти к более детальному обсуждению смешанных состояний на языке матриц плотности, который позволит логично перейти к геометрическому анализу кутритных чистых и смешанных состояний.

Литература

1. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Математические вопросы расширения основ квантовых теорий // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С. 71-84.
2. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Введение в геометрию N-арных комплексных чисел // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С. 75-84.
3. Ammosov V., Volkov G. Can neutrino probe extra dimension?, Report number: DFPD-00/ТН/39, arXiv: 0008032v1 [hep-ph], 2000, 10 p.
4. Volkov G.G. Geometry of Majorana neutrino and new symmetries, Annales Fond Broigle, 31, 2006, 227 p.
5. Volkov G. Possible Signals from the D=6 Space-Time, arXiv:1112.3583v1 [hep-ph], 2011, 31 p.
6. Baranov D.S., Volkov G.G. Neutrino On The Possible New Time Structure, arXiv:1302.1482v1 [hep-ph], 2013, 40 p.
7. Dubrovskiy A., Volkov G. Ternary numbers and algebras. Reflexive numbers and Berger graphs, Adv. Appl. Clifford Algebras, 17 (2007). P. 159-181.
8. Lipatov L.N., Rausch de Traunbenberg M., Volkov G.G. On the ternary complex analysis and its applications, Journal of Mathematical Physics 49, 013502 (2008), 28 p.
9. Volkov G.G., Maslikov A.A., Geometry of the Standard Model. Nonlinear Dynamics and Applications, Proceeding of the Twenty first Annual Seminar «NPCS», Minsk, 20 (2014). P. 257-264.
10. Волков Г.Г., Кукин Н.С., Глотова И.О., Мурадова А.Р., Тернарная групповая алгебра. Комплексный анализ в Эвклидовом пространстве // Известия Института инженерной физики, 2016. №3 (41). С. 50-56.
11. Волков Г.Г., Кукин Н.С., Глотова И.О., Мурадова А.Р., Холина Ю.С. Геометрии и симметрии атомарных квантовых систем // Известия Института инженерной физики, 2017. №1 (43). С. 48-57.
12. Schirhagl R., Chang K., Loretz M., Degen C. Nitrogen vacancy centres in Diamond: nanoscale sensors for Physics and biology, Annual Review of Physical Chemistry, 65, 2014. P. 83-105.
13. Doherty M.W., Manson N.B., Delaney P., Jelezko F., Wrachtrup J., Hollenberg L.C.L. The nitrogen-vacancy color center in diamond, Physics Reports 528, 1 (2013), 101 p.
14. Duan L.-M., Lukin M.D., Cirac J.I., Zoller P. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics, Nature 414, 2001. С. 413-418 (2001).
15. Волков Г.Г., Смуров С.В. Спин-электронные и ядерные кубиты. Квантовое запутывание NV-центров алмаза // Известия Института инженерной физики, 2017. №3 (44). С. 40-49.
16. Баранов П.Г. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР), Лекции ФТИ им. Иоффе, 2010.
17. Mintert F., Viviescas C., Buchleitner A. Basic Concepts of Entangled States, Lect. Notes Phys. 768, 2009. P. 61-86.
18. Frimmer M., Novotny L. The classical Bloch equations, Am. J. Phys. 82 (10), 2014, P. 947-954.
19. Liparteliani A.G., Monich V.A., Nikitin Yu.P., Volkov G.G. Neutral mesons with heavy quarks and mixing angles in six-quarks model, Nuclear Physics, Section B, 195(3), 1982. P. 425-451.
20. Смуров С.В., Волков Г.Г., Кукин Н.С., Мурадова А.Р., Корчевая И.О., Мартынова И.А. Квантовая взаимосвязь групп симметрии NV-центра и многоэлектронных спиновых структур // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С. 31-37.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR LABORATORY SCIENTIFIC RESEARCH

Алексей Ильич Вагин
кандидат технических наук
директор НТЦ «Терагерцы»
ЗАО «РТИ-Радио»
Адрес: 127083, Москва,
ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1
Тел.: +7(495)314-28-88
E-mail: vaguine@inbox.ru

Александр Николаевич Сытин
доктор физико-математических наук
профессор кафедры АТПИП
филиал «Протвино» Государственного
университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: 8 (4967) 31-02-34
E-mail: alexander.syтин@gmail.com

Илья Ефимович Кузнецов
начальник сектора НТЦ «Терагерцы»
ЗАО «РТИ-Радио»
Адрес: 127083, Москва,
ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1
Тел.: +7 (903) 179-11-95
E-mail: kuilef42@gmail.com

Игорь Викторович Лобов
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
филиал «Протвино» Государственного
университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: 8 (4967) 31-02-34

Валерий Аркадьевич Коковин
кандидат технических наук
заведующий лабораторией
филиал «Протвино» Государственного
университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: 8 (4967) 31-02-34
E-mail: alekskv@mail.ru

Владимир Иванович Дягилев
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры АТПИП
филиал «Протвино» государственного
университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел. 8 (4967) 31-02-34
E-mail: dvi-39@mail.ru

Аннотация

Проанализированы решения по созданию стендов для исследования лазерного излучения магнетронов, работающих на сравнительно высоких частотах и потребляющих значительную энергию. На основании проведенного анализа был разработан программно-аппаратный комплекс по управлению исполнительными устройствами стенда и измерению параметров различных объектов исследования. Обоснован выбор программной и аппаратной платформы комплекса. Приведена структурно-функциональная схема для измерения большого числа параметров физических установок с представлением их оператору в режиме реального времени на основе графических интерфейсов и программ доступа к базам данных.

Ключевые слова: стенд для исследования лазерных излучений, программная и аппаратная платформа, LabVIEW, SCADA.

Summary

The decisions on creation of stands for the study of laser radiation, magnetrons working at comparatively high frequencies and consuming considerable energy are analyzed. Based on the analysis, a software and hardware complex was developed to manage the executive devices of the stand and to measure the parameters of various research objects. The choice of the software and hardware platform of the complex is well founded. A structural-functional scheme for measuring a large number of parameters of physical installations with their representation in real-time on the basis of graphical interfaces and programs for accessing databases is presented.

Keywords: stand for laser radiation research, software and hardware platform, LabVIEW, SCADA.

* Работа выполнена в рамках договора №НПР1/14 от 9.01.14 «Разработка и поставка программного обеспечения для системы автоматизации стенда» между ГБОУ ВПО «Международный университет природы, общества и человека «Дубна» и ЗАО «РТИ-Радио».

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение

Исследовательские работы, базирующиеся на лазерном и магнетронном излучениях, с анализом высокоэнергетических сигналов на сравнительно высоких частотах требуют создания стендов для проведения необходимых испытаний [1]. На этих стендах формируются сигналы управления, изменяются характеристики компонентов установок с применением датчиков различных типов с последующим анализом этих характеристик. Проведение этих измерений ведется в условиях значительных высокочастотных наводок и помех, поэтому вопросы экранирования, специального заземления отдельных узлов установок и коммуникаций, а также применение специализированных источников питания, представляют значительный интерес.

Для осуществления перечисленных работ создаются программно-аппаратные комплексы (ПАК) на базе программно-аппаратных средств, с помощью которых можно измерять, накапливать результаты измерений в соответствующих базах данных (БД) и управлять отдельными процессами с автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора или пульта управления (ПУ) [2]. Большое число измеряемых параметров необходимо обработать и представить оператору в режиме реального времени для анализа и дальнейшего принятия решений [3]. Задачи подобного типа решаются с помощью разработки графических интерфейсов и программ доступа к базам данных [4].

В связи со значительным прогрессом в области информационных технологий и, в частности, с развитием сетевых средств, представляется перспективной возможность применения дистанционного управления установками, что требует разработки специализированных программных средств, обеспечивающих такую возможность.

1. Требования, предъявляемые к программному обеспечению, и их анализ

Основная задача, которую должна решить система управления (СУ) – обеспечение повторяемости работы тех исполнительных устройств стенда, которые в данный момент обеспечивают заданный режим.

СУ ПАК должна предоставить следующие возможности:

- менять управляющие параметры, влияющие на процесс разряда;
- проводить быстрое (длительность 10 мкс) измерение анодных тока и напряжения;
- отслеживать текущие значения медленных аналоговых и статусных сигналов;
- устанавливать управляющие напряжения зарядки анодной накопительной емкости и зарядки емкости блока поджига в требуемое значение в течение заданного интервала времени;

- выдавать синхроимпульсы длительностью 1 мкс в заданные моменты времени;

- отображать на экране текущее состояние всех измеряемых аналоговых величин и статусных сигналов;

- отображать на экране осциллограммы анодных тока и напряжения разряда, сравнивать две осциллограммы путем наложения;

- сохранять все измеренные данные в базе данных (БД);

- иметь необходимый набор возможностей просмотра и анализа сохраненных в БД данных;

- сохранять их в базе данных для возможности их дальнейшего просмотра, анализа и контроля критически важных значений.

Для решения задачи создания системы управления стендом можно использовать различные подходы.

Первый подход заключается в том, что на рынке приобретаются системы, специально предназначенные для сбора данных с большого количества датчиков исходной информации и управления большим числом исполнительных устройств – SCADA (аббревиатура от Supervisory Control And Data Acquisition – система управления и сбора данных). При этом предполагается минимум затрат ручного труда на адаптацию этого ПО для решения требуемой задачи.

Примерами известных SCADA-систем являются Wonderware [5], TRACE MODE фирмы AdAstra [6], PVSS система, используемая в ЦЕРНе [7]. Особенностью систем SCADA является то, что они работают с очень широким спектром стандартизованных устройств сбора данных и управления, которые предоставляет рынок.

Другой, противоположный подход, предполагает максимум ручного труда с использованием средств разработки нижнего уровня: компиляторов, отладчиков и т.д. Сильной стороной использования этого подхода является то, что создаваемая система будет очень оптимальной и быстрой, в ней не будет избыточности, свойственной системам SCADA. Однако время, требуемое для разработки такой системы, растет более чем линейно с увеличением размеров самой системы. Соответственно растет вероятность внесения программистом ошибок в программное обеспечение.

В противовес обоим предыдущим подходам, представляется разумным использовать промежуточный вариант – разработка СУ вручную с использованием мощного инструментального пакета. Исходя из изложенного выше, было принято решение о том, что пакет LabVIEW фирмы National Instruments является наиболее подходящим для решения поставленной задачи. Пакет сочетает в себе лучшие качества SCADA-систем с одной стороны, и

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

возможностью создания исполняемых модулей с другой стороны. LabVIEW по сути является SCADA-системой, ориентированной на научно-исследовательские цели.

2. Анализ требований, предъявляемых к измерительному оборудованию

Обоснованный в предыдущем разделе выбор пакета программ LabVIEW, определяет специальные требования к выбору средств для создания аппаратной платформы автоматизированной системы измерения и управления. Основным требованием при выборе средств измерения и управления следует рассматривать возможность поддержки их программными драйверами, реализованных для пакета LabVIEW фирмы National Instruments. Поэтому, учитывая наличие широкого спектра измерительных устройств фирмы National Instruments, предпочтительным является использование электронного измерительного оборудования этой фирмы.

Выбор необходимого измерительного оборудования определяется параметрами измеряемых сигналов и диапазонами их изменения, что определяется техническим заданием.

3. Структурно-функциональная схема ПАК

На основе выбранного аппаратно-программного обеспечения разработана структурно-функциональная схема ПАК, которая представлена на *рисунке 1*.

4. Взаимодействие программных и аппаратных компонентов ПАК

Функциями управляющей программы являются:

- установка требуемых параметров стенда и запись их в электронику;
- старт разряда;
- считывание данных из датчиков, памяти осциллографов;
- запись считанных данных датчиков и осциллограмм в базу данных;
- отображение текущих считанных данных на экране;

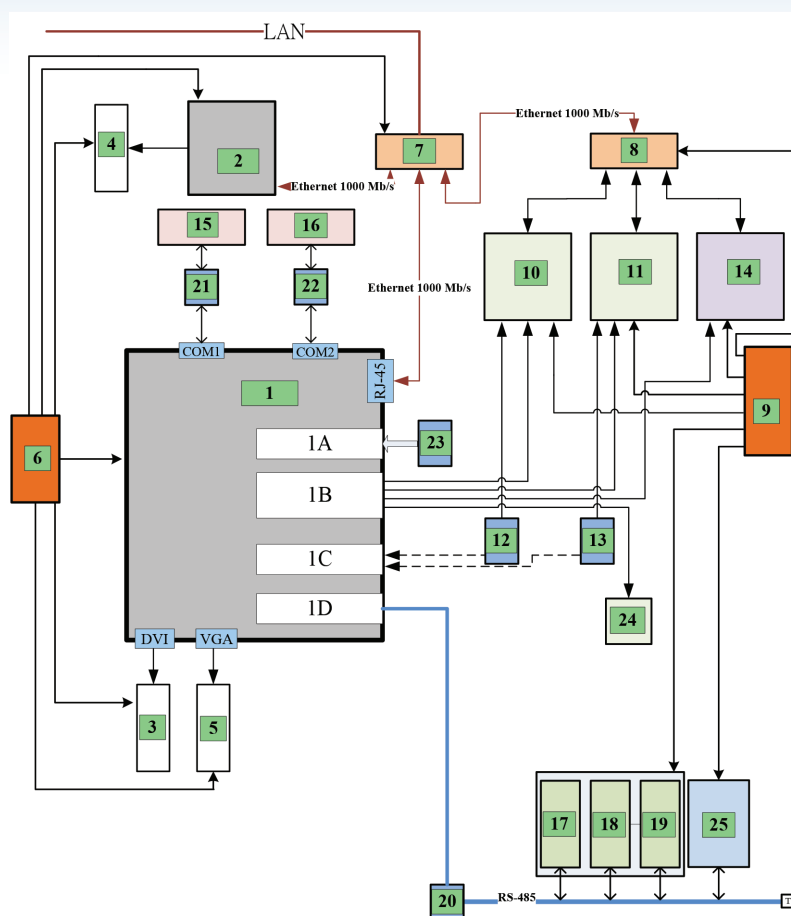


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ПАК:

- 1 – компьютер переднего края, 1А – плата АЦП PCIe – 6321, 1В – плата таймера PCI – 6602, 1С – плата АЦП PCI – 5154, 1D – плата Адаптер 4xRS-485 (изолированные каналы) PCI-8433/4. 2 – компьютер БД, 3,4,5 – мониторы, 6,9 – источники бесперебойного питания, 7 – роутер, 8 – коммутатор, 10,11 – осциллографы Tektronix, 12 – пьезоэлектрический датчик, 13 – детектор ТГц излучения, 14 – измеритель параметров лазерного излучения, 15,16 – ИП, 17,18,19 – датчики окружающей среды, 20 – опторазвязка для RS485, 21,22 – опторазвязки для RS232, 23 – генератор АКПП3305, 24 – вакуумметр

- поиск осциллограмм в базе данных, их просмотр и сравнение двух осциллограмм между собой;

На *рисунке 2* представлен внешний вид основного окна программы, в котором изображена упрощенная мнемосхема установки вместе со всеми измеряемыми данными.

Заключение

В рамках проведенной работы создан программно-аппаратный комплекс с большими возможностями по вычислительной обработке, по каналному масштабированию как по управляющим, так и по измерительным каналам, а так же по ви-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

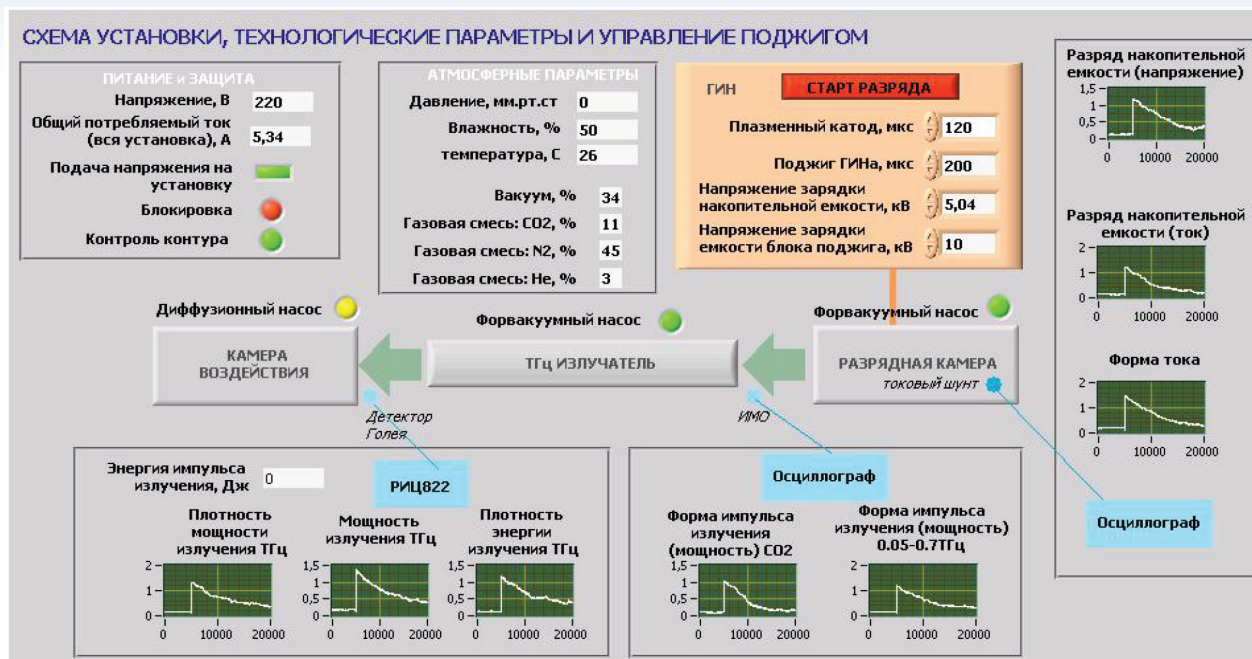


Рис.2. Мнемосхема установки

зуализации и архивированию результатов. Наличие в адаптирующей электронике комплекса основных промышленных интерфейсов (Ethernet, RS-232, RS-485, USB и т.д.) позволяет использовать для исследования всю гамму имеющихся на рынке современных измерительных приборов и управляющих устройств. Комплекс, имея модульную организацию по программному и аппаратному обеспечению, позволяет оперативно менять объект исследования и режимы управления стендами с помощью переконфигурирования. Проведенные исследования лазерной установки показали хорошую стабильность по управлению, высокую точность по измерению, оперативность представления информации на экране мониторов с визуализацией параметров экспериментов и результатов. Разработанный комплекс имеет универсальные возможности для исследования широкого спектра задач в рамках возможностей измерительных приборов. В тестовом режиме был испытан режим удаленного управления стендом с применением сетевых технологий.

Литература

1. Багров В.В., Климов Н.А., Нефедов С.В., Петров А.А., Щербаков В.И., Шишковский И.В. Программно-аппаратный комплекс по селективному лазерному спеканию // Известия Самарского научного центра РАН. 2003, Т.5. № 1(9). С. 55-64.
2. Калинин Ю.А., Крехова Е.Ю., Поздняков А.Е. Лазерная установка с наносекундной длительностью импульса излучения для исследования лучевой прочности оптических материалов и покрытий // Фотоника, 2016. № 2, С. 32-44.
3. Kokovin V.A., Sytin A.N. The processing of information from sensors in intelligent systems // Journal of Physics: Conference Series, 2017. Vol. 803, №1, 012075. doi:10.1088/1742-6596/803/1/012075
4. Chappelle E.W., Wood F.M., McMurtrey J.E., Newcomb W.W. Laser-induced fluorescence of green plants for the remote detection of plant stress and species differentiation // Appl. Opt. 1984. Vol. 23, №1. P. 1-5.
5. <http://www.wonderware.ru/solutions/>
6. <http://www.adastra.ru/>
7. <http://epaper.kek.jp/ica03/PAPERS/TU201.PDF>

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.94

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ
К ИМИТАЦИОННОМУ
МОДЕЛИРОВАНИЮ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**METHODS OF PERFORMANCE
EVALUATION OF INTELLIGENT
CONTROL SYSTEMS IN APPLICATION
TO SIMULATION OF ROBOTIC SYSTEMS**

Евгений Валерьевич Умников

ведущий инженер
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д.1а
Тел: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

Олег Игоревич Атакищев

доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по специальным проектам
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д.1а
Тел: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

Владимир Анатольевич Грачёв

почетный работник высшего профессионального образования
кандидат педагогических наук
советник Президента Института
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д.1а
Тел: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные методы оценки эффективности применения интеллектуальных систем управления РТК при использовании перспективных программных средств имитационного моделирования взаимодействия РТК виртуального полигона. Описаны возможные цели оценки эффективности и допущения в рамках темы виртуального полигона, приведен примерный состав показателей эффективности, возможные направления исследований эффективности с учетом моделирования циклов НОРД.

Ключевые слова: имитационное моделирование, виртуальное моделирование РТК, многоцелевой виртуальный робототехнический полигон, интеллектуальная система управления, показатели эффективности РТК, оценка эффективности.

Summary

In the article the basic approaches and methods for evaluating the robots intelligent control systems effectiveness by using multipurpose robotic simulation systems in the application of the virtual playground. Described the possible purpose of assessing the effectiveness and assumptions within the theme of the virtual playground, indicators of efficiency, the possible directions of research of effectiveness based on the modeling of OODA cycles.

Keywords: simulation, simulation of robots, multipurpose robotic simulation systems, intelligent control systems, robots performance indicators, performance evaluation.

Задачи применения, стоящие перед разработчиками современных робототехнических комплексов (РТК), вынуждают их использовать все более сложные системы моделирования, позволяющих учесть существенные факторы окружения в процессе предполагаемого функционирования

РТК, более оперативно формировать стратегии действий как одиночных РТК, действующих автономно, так и гетерогенных групп РТК, действующих по общей стратегии, а так же, учитывать при этом реализацию стратегии другой, взаимодействующей или противодействующей стороны.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Многоцелевой виртуальный робототехнический полигон (ВП), вариант концепции которого был описан в работе авторов [10], предполагает создание распределенной программно-аппаратной платформы симулирования процессов функционирования интеллектуальных или человеко-машинных многоагентных систем управления РТК. Ключевым элементом и основным отличительным признаком от прочих систем имитационного моделирования, является применение сервера ВП в роли «держателя среды», диспетчера подключения сторонних «интеллектуальных клиентов» управляющих моделями РТК в среде ВП, «арбитра» моделирования взаимодействий РТК и требует соответствующие методы комплексной оценки эффективности.

Основной формой системного анализа эффективности сложных технических систем является имитационное исследование, проводимое в рамках имитационных моделей. При этом стремятся к наиболее полному учету всех существенных факторов [1]. Порядок событий при таком моделировании соответствует порядку следования в реальной системе, но, при необходимости, в измененной временной шкале. Кроме того, в ключевые моменты, процесс моделирования может быть приостановлен для проведения дополнительных действий вне ВП, например, экспертного опроса с использованием данных, полученных в ходе текущей сессии моделирования.

Важнейшим свойством ВП является возможность объединения в одном виртуальном пространстве эксперимента как виртуальных, математических моделей интеллектуальных систем управления (ИСУ), так и неформализованных, реальных внешних участников: людей и образцов физических элементов систем управления (ИСУ) РТК, подключаемых через соответствующие интерфейсы к ВП в клиент-серверной архитектуре.

Виртуальная, математическая модель ИСУ взаимодействует с другими моделями СУ в пространстве ВП как сторонний «агент», функционирующий в процессе работы программы на компьютере, подключенном как «клиент» к серверу ВП. Данный клиент получает от сервера ВП поток структурированной информации о происходящем в моделируемом пространстве ВП, имитирующий поток от возможных реальных сенсорных систем моделируемого РТК. Также, ВП транслирует клиенту информацию, связанную с обменом данными с другими клиентами ВП. Затем эта информация обрабатывается программно моделью ИСУ и ее управляющий отклик перенаправляется серверу ВП как реакция моделируемого РТК. Обмен данными меж-

ду агентами в среде ВП может быть реализован как в форме имитации радио эфира, оптического и иного физического взаимодействия ИСУ агентов, так и в виде высокоуровневого, символично-кодowego взаимодействия, как результата декодирования физического.

Достоинством моделирования в ВП является возможность фиксации промежуточных значений различных показателей в процессе моделирования и последующей «оцифровки» подключенных неформализованных источников путем математической обработки полученных данных для дальнейших циклов моделирования уже в полностью автоматическом режиме.

Самым существенным свойством ВП является возможность моделировать действия ИСУ «конкурирующей» стороны. Процесс такого моделирования дает возможность максимально приблизиться к реальной конкурентной обстановке, описываемой циклами Бойда [2], реализовать в эксперименте и оценить эффективность действий участников «спирали» из циклов Бойда. Появляется возможность оценить эффективность стратегий конкурентного взаимодействия и военных игр с применением ИСУ РТК в заданных и динамически изменяющихся условиях, а также выявить ключевые особенности моделируемого РТК, как положительные, так и отрицательные.

Авторам представляется немаловажной возможностью оценки эффективности W участников моделирования не только по результатам эксперимента, как указывается в [1,3,4], но и в процессе моделирования, по достижении выделенных фаз развития процессов и оценки применяемых стратегий с использованием вариантов оценок «мгновенной» W' и «накопленной» W_s эффективности.

По классификации моделей, имитационное моделирование с применением ВП является динамическим, вероятностным, дискретно-непрерывным [1].

Определение цели проектирования, концепции системы в целом, связей проектируемой системы с окружением и их направленности, а также способы взаимодействий определяют структурно-параметрическую модель, которая в общих чертах отражает облик системы. Структурно-параметрическая модель является основой построения модели функционирования системы [1].

На *рисунке 1* представлена структурная схема S_o -системы. На схеме показаны основные компоненты системы: управляющая система; средства и ресурсы; объект воздействия; руководящая система, которая осуществляет функции целеполагания и координации. Фактически, ВП (поме-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

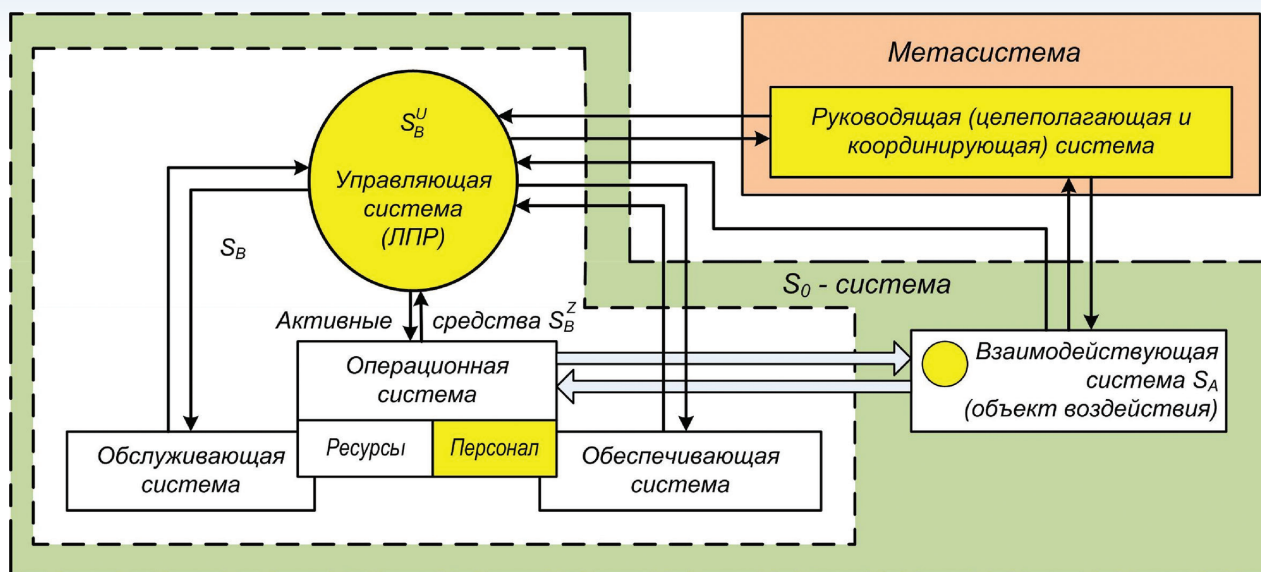


Рис. 1. Структурная схема системы [1]

чено зеленым) является средством моделирования S_0 системы, включающей в себя произвольное количество взаимодействующих систем S_A , S_B и дающей возможность руководящей и координирующей системе управлять извне условиями взаимодействий в рамках ВП для оценки эффективности систем S_A , S_B по разным критериям.

Необходимо обратить внимание на то, что во всех компонентах структурной схемы присутствует человеческий фактор (помечено желтым) или фактор неопределенности, связанный с принятием решения соответствующей ИСУ. Управляющая система современных РТК содержит как управляющий орган (лицо, принимающее решения – оператор) со средствами управления (включая каналы связи), так и систему управления, имеющую заданный уровень автономности.

Одним из основных направлений применения ВП является моделирование управляющих решений ИСУ и оценка их эффективности. В соответствии с идеями Дж.Бойда любая деятельность в конкурентной среде с определённой степенью приближения может быть представлена в виде кибернетической модели OODA (НОРД) [2]. Эта модель предполагает многократное повторение петли действий, составленной из четырех последовательных взаимодействующих процессов: **Наблюдение, Ориентация, Решение, Действие (НОРД)**. Ситуация с действиями развивается по спирали, и на каждом этапе осуществляется взаимодействие с внешней средой и воздействие на конкурента. Модель относится к разряду кибернетических, так как в ней реализуется принцип «обратной связи», в соответствии с которым часть выхода из системы снова подаётся на её вход, чтобы уточнить, а если по-

требуется, и скорректировать, развитие системы на последующих этапах.

Особо отмечается [2] соответствие петли Бойда общей методологии научного метода: «наблюдение - формирование гипотезы - проверка гипотезы - построение теории», соответствующей данным наблюдения. Научный метод служит для проверки теории на соответствие экспериментам и использует эксперименты для формирования новых теорий или корректировки существующих. Сходство прагматической идеологии цикла Бойда и научного метода является в определенной степени подтверждением междисциплинарного характера модели НОРД.

Существуют два основных способа достижения конкурентных преимуществ, при осуществлении различных видов профессиональной, в том числе и военной, деятельности. Первый путь - сделать циклы действий более быстрыми, что вынудит противника реагировать на ваши действия. Второй путь - улучшить качество принимаемых вами решений, то есть принимать решения, в большей степени соответствующие складывающейся ситуации, чем решения вашего противника. Моделирование применения ИСУ РТК с помощью ВП дает возможность оценки скорости принятия и исполнения решений, эффективности принятых решений и оценки конечного результата виртуального применения РТК с применением модели НОРД.

Уровни исследования для оценки эффективности робототехнических комплексов с использованием виртуального полигона

Опыт исследования эффективности технических систем показывает целесообразность введе-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ния четырех качественно различных методологических уровней анализа систем [1]. На рисунке 2 изображена схема методологических уровней анализа систем:

I уровень — «состав-свойства» (или *элементарный уровень*);

II уровень — «структура-функции» (или *агрегативный уровень*);

III уровень — «организация-поведение» (или *системный уровень*);

IV уровень — «метасистема-деятельность».

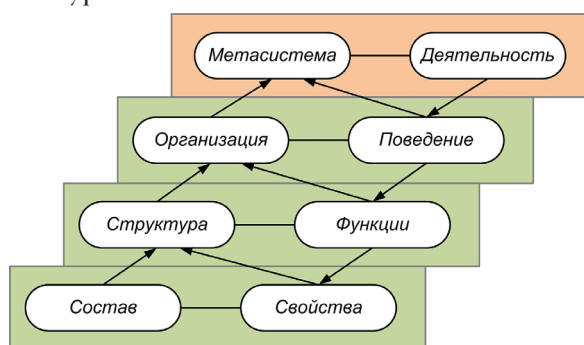


Рис. 2. Схема методологических уровней анализа систем [1]. Зеленым помечены уровни, включенные в состав моделируемой структуры РТК на ВП

Необходимо учитывать, что поскольку основным уровнем исследования является III-й, все, что касается II и, особенно, I уровней, участвует в моделировании и оценивается опосредованно или укрупненно, путем наследования и инкапсулирования существенных свойств и функций.

Системный уровень «организация-поведение». На этом методологическом уровне исследуются средние и крупномасштабные операции (S_0 -системы большого масштаба). В военных терминах, это – уровень тактического звена [7].

Обычно эффективность таких операций проявляется как их многомерное свойство, которое далеко не всегда удастся адекватно отобразить скалярным показателем эффективности. Чаще приходится использовать векторный показатель.

Наличие в системах управления РТК людей, наделенных правом принимать решения и имеющих различные цели, вносит существенную неопределенность поведенческого характера и в значительной мере затрудняет формализованное описание S_0 -системы третьего уровня.

Уровень «метасистема-деятельность». На этом уровне исследуются «глобальные» системы («метасистемы»), включающие в свой состав организации вместе с их внешней средой. Сложность подобных систем не допускает их формального представления. Анализ метасистемы и ее деятельности возможен лишь на вербальном (описательном) уровне [1].

Воспринять в таком виде внешнее дополнение может лишь человек. Вот почему участие человека (или системы управления с элементами искусственного интеллекта) принципиально необходимо в звене управления системы третьего уровня. Лицо, принимающее решение, формализуя внешнее дополнение, исходит из задач системы и использует при выработке решений определенные принципы.

Методы оценки эффективности ИСУ в применении к моделированию РТК с помощью ВП

Обобщенные критерии эффективности в рамках концепции пригодности

Критерий приемлемого результата: в условиях определенности в качестве показателя эффективности может быть выбран результат операции $y(u)$, цель которой носит количественный характер. В этом случае $\rho[y(u), y^{mp}] = y(u)$ критерий приемлемого результата рекомендует выбирать стратегию u из множества допустимых, удовлетворяющую условию:

$$u^* : y(u) \geq y^{mp},$$

где y^{mp} – приемлемый уровень результата.

Критерий допустимой гарантии: согласно этому критерию рекомендует выбирать стратегии u из условия

$$u^* : P[y(u) \geq y^{mp}] \geq P^{mp},$$

где P^{mp} – приемлемый уровень вероятностной гарантии.

Критерий допустимого гарантированного результата: согласно этому критерию подходящую стратегию выбирают из условия

$$u^* : \gamma y(u) \geq y^{mp},$$

где y^{mp} – допустимый уровень гарантированного результата с вероятностью γ .

В рамках концепции оптимизации

Критерий наибольшего результата: оптимальную стратегию выбирают из условия

$$u^* : \max_{u \in U} M[\hat{y}(u)] \quad (1)$$

Критерий наибольшего среднего результата: при существенном влиянии случайных факторов сам результат $y(u)$ выбирают в качестве функции ответственности. Тогда показатель эффективности есть математическое ожидание результата (средний результат). Критерий наибольшего среднего результата рекомендует выбирать в качестве оптимальной стратегию u^* , для которой

$$u^* : \max_{u \in U} M[\hat{y}(u)] \quad (2)$$

Критерий наибольшей вероятностной гарантии результата: если результат операции выражается случайной переменной $y(u)$ и четко опреде-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

лен требуемый результат, то показатель эффективности в этом случае есть вероятность того, что реальный результат операции примет значение не ниже требуемого уровня. Критерий наибольшей вероятностной гарантии рекомендует в качестве оптимальной выбирать стратегию из условия

$$u^* : \max_{u \in U} P[\hat{y}(u) \geq y^{mp}] \quad (3)$$

Критерий наибольшего гарантированного результата: при случайном характере результата операции, вероятностно-гарантированным результатом $\hat{y}(u)$ называют уровень, не ниже которого будет получен реальный результат с заданной вероятностью γ

$$u^* : P[\hat{y}(u) \geq \gamma y(u)] \quad (4)$$

Согласно критерию наибольшего гарантированного (вероятностно-гарантированного) результата оптимальную стратегию выбирают из условия

$$u^* : \max_{u \in U} \gamma(u) \quad (5)$$

при фиксированной вероятности γ . Критерий наибольшего гарантированного результата используется при достаточно высокой вероятности ($\gamma > 0,6 \dots 0,7$).

Критерий эффективности в условиях конфликта: критерий наибольшего гарантированного результата в этом случае в качестве оптимальной рекомендует выбирать стратегию u^* из условия

$$u^* : \max_{u \in U} \min_{v \in V} M\{\rho[y(u, v), y^{mp}]\} \quad (6)$$

отражающего принцип максимина.

В рамках концепции адаптивизации

Принцип свободы выбора решений: этот принцип рекомендует не принимать на основе априорной информации решения во всех деталях на всю обозримую перспективу. Свобода выбора заключается в возможности пересмотра или уточнения ранее принятого решения на основании текущей информации.

Принцип селекции: На каждом этапе процесса принятия решений предусматривается отбор нескольких решений, близких к лучшим. Затем из этих решений формируется ряд комбинаций и на следующем этапе отбирается несколько комбинаций, близких к лучшим, пользуясь критерием более высокого порядка, чем на предыдущем шаге. В итоге, получается ряд усложняющихся комбинаций решений, из которого отбирается несколько решений близких к лучшему.

Принцип самообучения: адаптивное поведение системы обеспечивается в процессе многократных внешних воздействий на систему, запоминанием реакций на эти воздействия и результатов реагирования, а также корректировкой реакций,

направленной на повышение эффективности поведения системы. Накапливаемая информация в процессе самообучения используется для усовершенствования критерия эффективности.

Частные показатели эффективности ИСУ РТК на ВП

Поскольку условия оперативно-тактической обстановки непрерывно изменяются, целесообразно оценку эффективности проводить только в расчете на диапазон условий, наиболее характерных для функционирования системы. Это позволит найти компромиссное решение, которое, не являясь строго оптимальным для отдельно взятых условий, будет обладать приемлемой эффективностью в целом диапазоне условий. Таким образом, учитывая основные требования к функционированию СУ ТЗ, есть все основания оценивать ее эффективность по критериям *Оперативности, Адекватности и Устойчивости*. [7]

В соответствии с моделью НОРД, РТК на ВП проходят последовательно и циклично процессы: *Наблюдение, Ориентация, Решение, Действие*. Таким образом, по мнению авторов, показатели эффективности РТК на ВП должны полностью покрывать оценками матрицу критериев, приведенную в таблице 1, а также дополнительные показатели экономической эффективности, связанные с общим жизненным циклом РТК [8].

Таблица 1

Матрица критериев эффективности РТК на ВП

	Оперативность	Адекватность	Устойчивость
Наблюдение	1.1 ОН	2.1 АН	3.1 УН
Ориентация	1.2 ОО	2.2 АО	3.2 УО
Решение	1.3 ОР	2.3 АР	3.3 УР
Действие	1.4 ОД	2.4 АД	3.4 УД
Интегрально	1.5 ИО	2.5 ИА	3.5 ИУ

Интегральные показатели по основным направлениям оценки эффективности могут вычисляться как показатель вероятностной гарантии (или степень гарантии) выполнения поставленной задачи [9].

Показатели эффективности по оперативности

1.1. Оперативность наблюдения: способность системы обеспечивать получение информации о текущем окружении и внутреннем состоянии в необходимые сроки. Среднее время обнаружения целей.

1.2. Оперативность ориентации: способность системы обеспечивать осознание и оценку информации в необходимые сроки. Продолжительность решения отдельных задач управления. Время распознавания «свой – чужой».

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

1.3. Оперативность решения: способность системы обеспечивать генерацию и коррекцию возможных стратегий по текущей и накопленной информации, принятие решения и его доведение в необходимые сроки. Время оценки контекста ситуации и прогнозирования развития. Время перевода систем РТК в установленные степени готовности.

1.4. Оперативность действия: способность системы обеспечивать действия по осуществлению принятого решения в необходимые сроки. Время результативного применения систем РТК по поставленным задачам. Мобильность РТК.

1.5. Интегральная оперативность - Обобщенный показатель эффективности по оперативности: показатель надежности упреждения или вероятность надежности упреждения [7]. Продолжительность общего цикла управления [8].

Показатели эффективности по адекватности

2.1. Адекватность наблюдения: способность системы обеспечивать получение актуальной информации о текущем окружении и внутреннем состоянии. Вероятность обнаружения объектов.

2.2. Адекватность ориентации: способность системы обеспечивать точность осознания и адекватность оценки динамики ситуации по накопленной информации. Вероятность правильного выделения целей. Вероятность своевременной реакции на действия противника.

2.3. Адекватность решения: способность системы обеспечивать генерацию и коррекцию эффективных и адекватных стратегий по имеющейся информации; принятие на их основе целесообразного и реалистичного решения с учетом факторов неопределенности. Вероятность перевода систем РТК в установленные степени готовности.

2.4. Адекватность действия: способность системы обеспечивать требуемую последовательность и достаточный уровень усилий по осуществлению принятого решения. Вероятность результативного применения систем РТК по поставленным задачам.

2.5. Интегральная адекватность - Обобщенный показатель эффективности по адекватности: показатель надежности (вероятности) осуществления правильных действий РТК.

Показатели эффективности по устойчивости

3.1. Устойчивость наблюдения: способность системы обеспечивать получение достоверной и актуальной информации о текущем окружении и внутреннем состоянии в условиях информационного противодействия и наличия «шумовой» информации. Максимальный уровень шумов. Скрытность наблюдения.

3.2. Устойчивость ориентации: способность системы обеспечивать необходимый уровень точности осознания и адекватности оценки динамики ситуации по накопленной информации в условиях информационного противодействия. Максимальный уровень маскировки целей. Количество ложных целей.

3.3. Устойчивость решения: способность системы обеспечивать необходимый уровень целесообразности и реалистичности принимаемых решений с учетом факторов неопределенности в условиях информационного противодействия. Допустимый уровень потерь и нарушений в системе управления.

3.4. Устойчивость действия: способность системы обеспечивать требуемую последовательность и достаточный уровень усилий по осуществлению принятого решения в условиях физического противодействия. Вероятность выполнения мероприятий цикла управления в заданное время.

3.5. Интегральная устойчивость - Обобщенный показатель эффективности по адекватности: показатель надежности (вероятности выживания) сохранения функционала РТК условиях противодействия. Время на восстановление нарушений в системе. Количество и вероятность нахождения РТК в работоспособном состоянии после цикла противоборства.

Дополнительные показатели эффективности

4.1. Абсолютная эффективность функционирования: внутренняя эффективность системы в реальных условиях, определяется как степень реализации ее потенциальных возможностей [8].

4.2. Относительная эффективность функционирования: внешняя эффективность системы в реальных условиях, определяется как степень приспособленности к выполнению поставленных задач.

4.3. Техническая эффективность функционирования: время регламентных работ обслуживания, показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Показатели безопасности функционирования. Показатели производительности. Эргономические показатели.

4.4. Экономическая эффективность функционирования: капитальные и эксплуатационные затраты. Затраты на разработку и модернизацию. Показатели расходов (сбережения). Ресурсопотребление.

4.5. Эффективность жизненного цикла: временные показатели, характеризующие этапы разработки, эксплуатации и утилизации РТК. Качество реализации, технологии управления, развития и наследуемости.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Выводы

Охарактеризованы ключевые отличия ВП от классических систем имитационного моделирования систем. Описаны возможные методические подходы к определению эффективности интеллектуальных систем управления в применении к моделированию РТК с помощью ВП. Обоснована матрица частных показателей оценки эффективности РТК и приведены основные показатели, доступные при моделировании с помощью ВП.

Литература

1. Куренков В. И. Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы. Минобрнауки России. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева, 2012.
2. Ивлев А.А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. Монография. М.: Знание, 2008. 64 с.
3. Чумаков Н.М., Серебряный Е.И. Оценка эффективности сложных технических устройств. М.: Сов. радио, 1980. 192 с.
4. Сосюра О.В. Теоретические основы оценки эффективности управления войсками // Военная мысль, 1993. № 11.
5. Крутихин Д.Л. Методика оценки эффективности функционирования служб технического обслуживания и ремонта оборудования на промышленном предприятии // Экономика и образование. 2011. №10.
6. Маслова Н.А. Методы оценки эффективности систем защиты информационных систем // Штучний інтелект. Донецк, 2008. №4.
7. Демкин О.А. О выборе критериев оценки эффективности функционирования системы управления тактического звена // Военная мысль, 2004. №10. С.37-43.
8. Гульбис С.К. Классификация показателей эффективности функционирования системы управления войсками // Наука и военная безопасность, 2008. №4.
9. Панин О. Проблемы оценки эффективности функционирования систем физической защиты объектов. /БДИ, 2007. №3.
10. Умников Е.В., Грачёв В.А., Мурашов А.Г. Концепция многоцелевого виртуального робототехнического полигона // Материалы 11 Всероссийской НПК «Перспективные системы и задачи управления»; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ. Т.2. 2016.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.23

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ЛОКОМОТИВЕ

TECHNIQUE FOR ASSESSING THE POSITION AND ORIENTATION OF THE TECHNICAL VISION SYSTEM ON THE LOCOMOTIVE



Денис Евгеньевич Быстров

заместитель начальника отдела –
начальника группы 5 отдела
Управление перспективными и
межвидовыми исследованиями
и специальными проектами МО РФ
Москва
Тел.: 8 (916) 807-01-03
E-mail: 9168070103@mail.ru

Александр Сергеевич Лычагов

кандидат технических наук
преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (985) 135-48-38,
E-mail: lichagov@rambler.ru

Рамиль Равильевич Бикмаев

программист МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93

Анатолий Николаевич Андреев

аспирант МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г.
Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93

Аннотация

В статье рассматривается вопрос выбора «оптимального» места установки камеры на локомотиве для минимизации ошибок вычисления координат.

Ключевые слова: система технического зрения, камера, подвижный рельсовый состав, навигация.

Summary

In article the question of the choice of a "optimum" installation site of the camera on the locomotive for minimization of errors of calculation of coordinates is considered.

Keywords: system of technical sight, camera, mobile rail structure, navigation.

Введение

Актуальность использования систем технического зрения (СТЗ) для навигации подвижных объектов в настоящее время уже не требует обоснования [1,2,4,11-14]. Однако, не смотря на то, что в настоящее время решается большое количество различных задач по обеспечению движения, не достаточное внимание уделяется вопросу по оптимальному размещению камер на подвижном объекте.

В работе описывается математическая модель СТЗ для одной камеры, на основе которой формируется математическая модель СТЗ локомотива и вагона подвижного состава. Определяются параметры размещения камеры на вагоне и локомотиве обеспечивающем минимальность погрешностей определения координат реперов.

Математическая модель системы технического зрения

СТЗ представляет собой камеру, располо-

женную на объекте. В каждый момент времени t системой формируется цветное изображение I_p , представляемое в rgb диапазоне матрицей размерности $h \times w \times 3$ с параметрами яркости $[0;255]$, где параметры h, w – высота и ширина изображения соответственно. Изображение располагается в системе координат (u, v) , а положение i -го пикселя задается координатами (u_i, v_i) (рисунки 1 а).

Матрица внутренних параметров СТЗ известна и задается в следующем виде [3,5,9,10]

$$K = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где f_u, f_v – фокусные расстояния вдоль каждой из осей (в следствие не квадратичности пикселей $f_u \neq f_v$);
 u_0, v_0 – координаты принципиальной точки изображения.

Взаимосвязь координат точки изображений

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

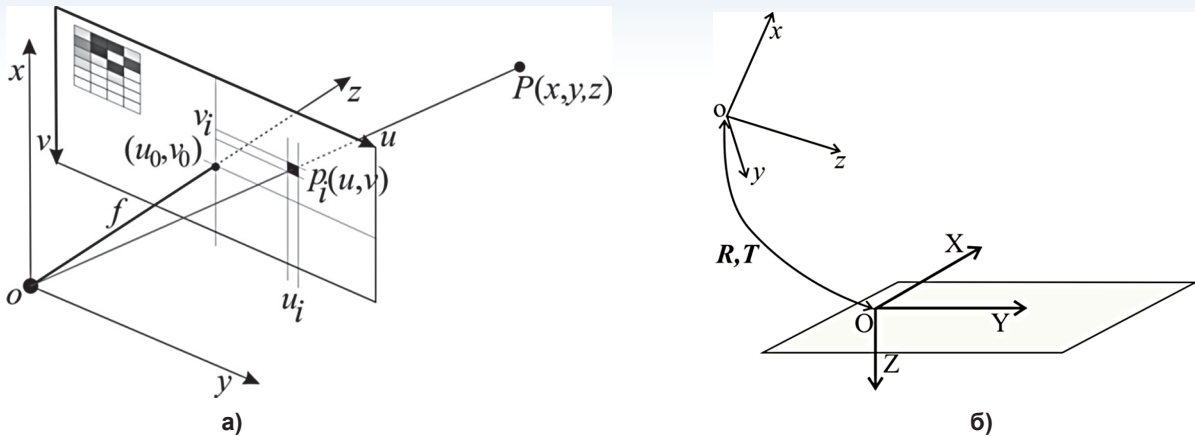


Рис. 1. а) Система координат изображения и камеры; б) Система координат СТЗ и ГСК

$p_i(u, v)$ и СТЗ $P_i(x, y, z)$ задается формулой

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \cdot [K \ O^T] \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где O^T – соответствующий «нулевой» вектор столбец размерности 3×1 .

Положение камеры на объекте относительно глобальной системы координат (ГСК) (рисунк 1 б) задается матрицей направляющих косинусов R и вектором трансформации T [3,5,9,10]

Тогда проекционная матрица изображения для перехода от СК изображения в ГСК примет вид

$$P = K \cdot [R \ T^T] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Откуда получим

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{где} \quad H = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{34} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{34} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Тогда выражения для нахождения X, Y примут вид

$$\begin{aligned} X &= \frac{h_{11} \cdot u + h_{12} \cdot v + h_{13}}{h_{31} \cdot u + h_{32} \cdot v + h_{33}} \\ Y &= \frac{h_{21} \cdot u + h_{22} \cdot v + h_{23}}{h_{31} \cdot u + h_{32} \cdot v + h_{33}} \end{aligned} \quad (5)$$

Методика определения оптимального положения камеры на локомотиве

Для решения данной задачи необходимо сформировать выражения характеризующие точность определения координат X, Y в зависимости от точности измерения параметров u, v . Основным параметром, характеризующим погрешность в информационно-измерительных системах, является среднеквадратическая ошибка (СКО) σ (далее

просто ошибка) [6,7,8]. Погрешность определения выходной величины X, Y включает отдельные составляющие, которые зависят от ошибок измерения параметров u, v . При распределении отдельных случайных составляющих погрешности по нормальному закону и их взаимной некоррелированности, СКО выходной величины определяется по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\sigma_x^2(u) + \sigma_x^2(v)} \\ \sigma_y &= \sqrt{\sigma_y^2(u) + \sigma_y^2(v)} \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sigma_x(u), \sigma_x(v), \sigma_y(u), \sigma_y(v)$ – составляющие погрешностей определения X, Y от параметров u, v .

В свою очередь названные составляющие погрешностей определяются через, функции (коэффициенты) влияния ошибки определения отдельного параметра на соответствующую составляющую погрешности, то есть

$$\begin{aligned} \sigma_x(u) &= F_x^u \cdot \sigma_u \\ \sigma_x(v) &= F_x^v \cdot \sigma_v \\ \sigma_y(u) &= F_y^u \cdot \sigma_u \\ \sigma_y(v) &= F_y^v \cdot \sigma_v \end{aligned} \quad (7)$$

где $F_x^u, F_x^v, F_y^u, F_y^v$ – функции влияния ошибки измерения (определения) параметру u, v на погрешность определения выходных величин X, Y .

Основой для нахождения функций (коэффициентов) влияния ошибок определения отдельных параметров на погрешность выходного параметра является математическая модель. На основании данной математической модели методом варьирования переменных (нахождения полного дифференциала) определяют математическое выражение, показывающее влияние приращений каждого параметра на приращение самой функции. Для удобства анализа погрешностей введем новую переменную $R = X + Y$, тогда СКО σ_R будет определяться в соответствии с выражением

$$\sigma_R = \sqrt{\left[\left(\frac{dF_x}{du} \right)^2 + \left(\frac{dF_y}{du} \right)^2 \right] \cdot \sigma_u^2 + \left[\left(\frac{dF_x}{dv} \right)^2 + \left(\frac{dF_y}{dv} \right)^2 \right] \cdot \sigma_v^2} \quad (8)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Решим оптимизационную задачу, нахождения параметров R , T для которых значение функции представленной ниже будет наименьшим

$$\sigma_R(R, T) = \frac{1}{h \cdot w} \sum_{u=1}^w \sum_{v=1}^h \sigma_R(R, T, u, v) \quad (9)$$

Решение задачи проведем путем статистического моделирования путем варьирования переменных ΔR , ΔT .

Угол наклона камеры варьировался от 10° до 50° градусов (0° – камера установлена вертикально объективом вниз), высота установки камеры от 2,5 до 3,5 м, при этом обеспечивалась дальность видимости от 20 до 55 м, путем изменения угла наклона камеры, изменения высоты установки камеры, и совместным варьированием данных параметров.

Из полученного графика (рисунк 2) видно, что наименьшая ошибка обеспечивается путем изменения высоты установки камеры при минимальном отклонении камеры от вертикальности.

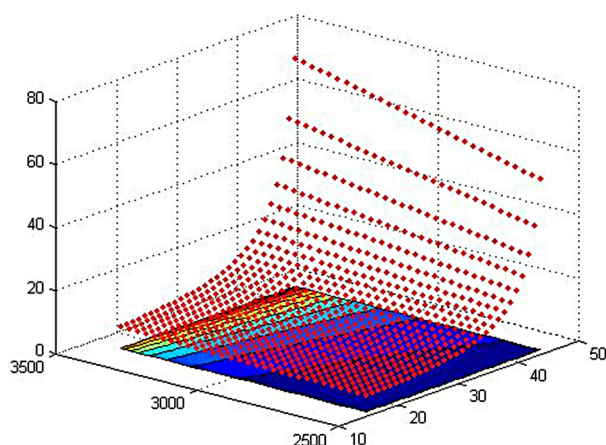


Рис. 2. График зависимости СКП определения параметра R от высоты установки и угла наклона камеры

Выводы

В статье представлена методика определения оптимального положения камеры на локомотиве, которая основывается на оценки погрешности определения координат в зависимости от угловой ориентации и высоты установки камеры. Результаты исследований показывают, что наибольший вклад в погрешность вносит угловая ориентация камеры – отклонение ее от вертикальности.

Дальнейшим направлением исследований является оценка стереосистемы, а также анализ вариантов размещения камер не в головной части локомотива, а на его бортах.

Литература

1. Артюхов М.Ю., Кропотов А.Н., Макашов А.А., Сахарова Е.И. Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами, 2011. В.4. С. 230-242.
2. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. Обработка и анализ изображения в задачах машинного зрения. М: Физматкнига, 2010. 689 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. Техносфера, 2005. 1072 с.
4. Давидсон П. Оценка дальности на основе монокулярного зрения и проприоцептивного движения // Гирокоспия и навигация, 2016. Т.24. № 4(95). С. 98-111.
5. Прет У. Цифровая обработка изображений // Пер. с английского. М., 1982. 357с.
6. Садеков Р.Н. Навигация подвижных объектов посредством систем технического зрения, комплексирование данных стерео-визуальных и курсо-одометрических систем / Рефераты докладов конференции «Использование сложных навигационных приборов в нетрадиционных областях» 18.10.2012 // МГТУ им Баумана, Москва, 2012. С. 3.
7. Садеков Р.Н. Позиционная навигация с использованием систем технического зрения // Известия Института инженерной физики, 2012. №2(24). С. 56-59.
8. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 496 с.
9. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
10. Шапиро Л.Г., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
11. Andreas, G. Vision meets Robotics: The KITTI Dataset/Andreas Geiger// (<http://www.cvlibs.net/datasets/kitti>). 2012, 6 p.
12. Fritsh, J. A New Performance Measure and Evaluation Benchmark for Road Detection Algorithms/ J. Fritsh, T. Kuhn, A.Geiger // ITSC 2013 publication. – 8 p.
13. The KITTI Vision Benchmark Suite/ Main page [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.kit.edu/english>. Дата обращения: 16.10.2013.
14. Yang, C Visual odometry on the Mars exploration rovers – a tool to ensure accurate driving and science imaging/ M.W.Maimone, L.Matthies// Robotics & Automation Magazine, IEEE, Volume 13, Issue 2, June 2006, Page(s):54-62.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.72

БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ: НАУКА, ИСКУССТВО, РЕМЕСЛО

FAST ALGORITHMS: SCIENCE, ART, CRAFT

Александр Павлович Царёв

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры архитектуры
компьютеров и телеинформатики
Западно-поморский технологический
университет в Щецине
Адрес: Wydział Informatyki ZUT, ul.
Żołnierska 52, Szczecin, 71-210
Тел.: +48 (91) 449-55-73
Email: acarior@wi.zut.edu.pl

Аннотация

В предлагаемой читателю статье обсуждается эффективный подход к конструированию быстрых алгоритмов вычисления векторно-матричных произведений. Умножение матрицы на вектор является базовой операцией для целого ряда прикладных задач, требующих обработки данных в режиме реального времени. Одна из возможностей сокращения времени вычислений – минимизация количества арифметических операций, необходимых для получения конечного результата. Сказанное служит стимулом интенсификации исследований в направлении рационализации алгоритмов, связанных с матричными вычислениями. Один из результатов такого исследования как раз и представлен в предлагаемой читателю работе.

Ключевые слова: быстрый алгоритм, матрица, арифметическая операция, матричное вычисление.

Summary

In the article proposed, an effective approach to constructing fast algorithms for computing vector-matrix products is discussed. Matrix-vector multiplication is the basic operation for a number of applications that require real-time data processing. One of the possibilities of reducing computation time is to minimize the number of arithmetic operations necessary to obtain the final result. This serves as a stimulus to intensify research in the direction of rationalizing algorithms associated with matrix calculations. One of the results of such a study is presented in the paper proposed to the reader.

Keywords: fast algorithm, matrix, arithmetic operation, matrix calculation.

1. Введение

Быстрые алгоритмы – это область информатики, которая изучает алгоритмы реализации различного рода вычислительных задач с использованием как можно меньшего числа математических (и прочих) операций. Развитие теории и практики конструирования быстрых алгоритмов издавна находилось в непосредственной зависимости от прогресса в области проектирования и производства средств электронной вычислительной техники. Можно смело утверждать, что именно несовершенство вычислительных машин первого, второго и третьего поколений способствовало появлению на свет быстрых алгоритмов.

Необходимо отметить, что, несмотря на упомянутое несовершенство, система команд компьютеров первых поколений все же содержала весь необходимый набор команд, требующийся для реализации математических вычислений. Однако, если такие операции как сложение и вычитание выполнялись этими компьютерами в течение

одного машинного цикла, то команда умножения требовала выполнения довольно длинной последовательности операций сложения и сдвига в соответствии с правилами умножения двоичных чисел. Эта последовательность операций обычно «прошивалась» на ферритовых кольцах в блоке постоянной памяти ЭВМ и хранилась там в виде микропрограммы. Ясно, что реализация такой микропрограммы требовала значительно большего времени, чем выполнение операции сложения или операции обращения к памяти. Таким образом, оказалось, что время реализации умножения явилось главным фактором, ограничивающим скорость решения прикладных задач.

Этот факт стимулировал поиск и развитие способов и методов, позволяющих сократить количество операций умножения при реализации тех или иных численных методов. Именно в рамках этого направления разработаны и применяются быстрые алгоритмы цифровой обработки данных [1].

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Прародителями быстрых вычислений с некоторой степенью условности можно считать немецких математиков К.Рунге и К.Гаусса, которые занимались поиском способов сокращения количества арифметических операций при проведении различного рода математических расчетов. Хорошо известен, к примеру, алгоритмический трюк Гаусса, позволяющий вычислить произведение двух комплексных чисел с помощью всего лишь трех умножений и пяти сложений действительных чисел [2].

Однако в качестве начала эпохи наиболее заметных достижений в области быстрых вычислений можно принять появление метода «разделяй и властвуй», разработанного в 1960 году А.А. Карациубой и продемонстрированного им, в частности, на примере синтеза нового эффективного алгоритма быстрого умножения больших целых чисел [3, 4].

Следующим революционным событием в научном мире стала разработка и публикация в 1965 году алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) авторства Дж.Кули и Дж.Тьюки, полученного по сути дела также с применением метода «разделяй и властвуй». Появление этого алгоритма стало переломным пунктом развития теории и практики цифровой обработки сигналов и изображений, а также целого ряда других областей науки и техники, поскольку позволяло радикально сократить количество арифметических операций при вычислении дискретного преобразования Фурье [5].

Позднее появились многочисленные «быстрые» алгоритмы, вычисления сверток и корреляций цифровых последовательностей, быстрые алгоритмы дискретных преобразований в различных ортогональных базисах и многие другие [6-8]. Среди прочих следует выделить ставшие «классикой» быстрых вычислений алгоритмы умножения матриц Штрассена, Винограда, алгоритмы умножения больших целых чисел Тоома-Кука, Фюрера и многие другие [9-11].

Главным преимуществом всех «быстрых» алгоритмов было радикальное сокращение операций умножения (снижение мультипликативной сложности) по сравнению с «наивными» алгоритмами.

Однако в ряде случаев снижение количества операций умножения приводило к увеличению количества сложений (аддитивной сложности) и почти всегда – к увеличению сложности управления процессом вычислений, а также к росту операций пересылки данных, на которые раньше никто не обращал особого внимания из-за их незначительного, по сравнению с умножением, временем выполнения.

С развитием технологии производства эле-

ментной базы электронных вычислительных машин, появлением СБИС, содержащих встроенные аппаратные умножители, позволяющих выполнить команду умножения в течении одного машинного цикла, значение быстрых алгоритмов несколько приуменьшилось. Неожиданно оказалось, что сокращение умножений в быстрых алгоритмах, вызывающее рост операций сложения и операций переадресации данных в условиях, когда время выполнения этих операций является сравнимым, может возыметь и негативный эффект. Практика показала, что по крайней мере в ряде случаев «наивные» подходы, основанные на трудоемких с точки зрения количества выполняемых арифметических операций, но более простых с точки зрения организации вычислений и реализации механизмов адресации данных алгоритмах, могут оказаться эффективнее их «быстрых» модификаций. Это дало возможность различного толка пессимистам и скептикам сделать вывод о дальнейшей нецелесообразности целенаправленного поиска и применения алгоритмических решений, позволяющих снизить вычислительную сложность математических расчетов.

В этой связи необходимо отметить, что в случае, когда компьютер или иное вычислительное устройство уже содержит встроенный аппаратный умножитель, сокращение числа операций умножения за счет непропорционально большого роста сложений может привести к негативным последствиям. Тем не менее, при проектировании специализированных СБИС-процессоров, особенно процессоров с распараллеливанием вычислений, в которых предполагается наличие целого ряда параллельно работающих блоков умножения, проблема минимизации количества этих блоков остается по-прежнему актуальной. Объясняется это тем, что если аппаратная сложность сумматора зависит от размера операндов линейно, то аппаратная сложность блока умножения – квадратично [12]. Умножитель по сравнению с сумматором занимает в кристалле значительно больше места, потребляет значительно больше энергии и выделяет значительно больше тепла. Ясно, что разработчик такого процессора будет стремиться к тому, чтобы его структура содержала как можно меньше блоков умножения. В этом случае поиск алгоритмических решений, приводящих к снижению аппаратных затрат, является необычайно актуальным. С этой точки зрения разработка быстрых алгоритмов является экономически обоснованной и технически целесообразной.

Необходимо отметить, что до сих пор не существует универсальной методики проектирования быстрых алгоритмов. Наиболее известные и интересные решения были получены на осно-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ве учета частных свойств и уникальных особенностей конкретных задач. Так например, алгоритм БПФ был разработан благодаря учету свойств периодичности и мультипликативности дискретных экспоненциальных функций, алгоритм быстрой циклической свертки - благодаря доказательству того, что свертка двух последовательностей может быть вычислена как произведение коэффициентов БПФ этих последовательностей. Так или иначе, разработка быстрого алгоритма требует от разработчика глубокого понимания особенностей решаемой задачи, а также не менее глубоких теоретических знаний. Такое положение дел может вызвать трудности у инженерно-технического персонала и специалистов, имеющих богатый практический опыт, но не обладающих достаточным уровнем теоретической подготовки, а в некоторых случаях - даже инспирировать нежелание самостоятельно разрабатывать такие алгоритмы.

Тем не менее следует признать, что процесс создания быстрого алгоритма является делом необычайно интересным и творческим. Многое здесь зависит не только от глубины знаний и уровня теоретической подготовки разработчика, но и от его интуиции и смекалки. Не последнюю роль играет также накопленный опыт и наличие навыков решения подобного рода задач. Поэтому можно с полной уверенностью утверждать, что разработка быстрых алгоритмов это одновременно и наука, и искусство, и ремесло.

2. Определение базового набора структурных эталонов, допускающих сокращение сложности вычислений векторно-матричных произведений

Итак, как уже было подчеркнуто, целью разработки быстрых алгоритмов вычисления векторно-матричных произведений является сокращение количества необходимых для их реализации арифметических операций. Надо сказать, что для произвольных матриц - матриц, содержащих неповторяющиеся элементы, достижение этой цели является достаточно проблематичным. Однако если некоторые из элементов матрицы повторяются, а еще лучше -

содержат целые композиции повторяющихся элементов, то с большой долей вероятности можно утверждать, что вычислительная сложность реализации векторно-матричного произведения для матрицы с такой структурой может быть снижена. В результате проведенных исследований [13, 14] был определен базовый набор эталонных матриц порядка N , блочная структура которых позволяет сократить сложность вычислений векторно-матричных произведений. В *таблице 1* приведены структуры матричных эталонов и указаны количества операций умножения и сложения, необходимых для вычисления произведения соответствующей эталонной матрицы на вектор. Ясно, что приведенный в *таблице 1* перечень эталонных структур не исчерпывает всего набора матриц, структуры или композиции повторяющихся элементов которых способствуют снижению вычислительной сложности операции векторно-матричного умножения. Очевидно, что приведенный перечень может быть расширен и дополнен новыми эталонами, однако уже эти структуры позволяют разрабатывать быстрые алгоритмы

Таблица 1
Структуры матричных эталонов N -того порядка

Тип эталонной структуры	Количество операций « \times »; « $+$ »	Тип эталонной структуры	Количество операций « \times »; « $+$ »
$\mathbf{A}_N^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{C}_{N/2} & \mathbf{D}_{N/2} \end{bmatrix}$	N^2 $N(N-1)$	$\mathbf{A}_N^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & \mathbf{C}_{N/2} \end{bmatrix}$	$3N^2/4$; $N(3N-4)/4$
$\mathbf{A}_N^{(3)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{C}_{N/2} \end{bmatrix}$	$3N^2/4$; $N(3N-4)/4$	$\mathbf{A}_N^{(4)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{C}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$3N^2/4$; $5N^2/4$
$\mathbf{A}_N^{(5)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{C}_{N/2} & -\mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$3N^2/4$; $5N^2/4$	$\mathbf{A}_N^{(6)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & -\mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$3N^2/4$; $5N^2/4$
$\mathbf{A}_N^{(7)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$; $N(N+1)$	$\mathbf{A}_N^{(8)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ -\mathbf{B}_{N/2} & -\mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$ $N(N+1)$
$\mathbf{A}_N^{(9)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$; $3N^2/4$	$\mathbf{A}_N^{(10)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & -\mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$; $3N^2/4$
$\mathbf{A}_N^{(11)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & -\mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$; $N^2/2$	$\mathbf{A}_N^{(12)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{A}_{N/2} & -\mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/2$; $N^2/2$
$\mathbf{A}_N^{(13)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \\ \mathbf{B}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/4$; $N(N-1)/2$	$\mathbf{A}_N^{(14)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \\ \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{B}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/4$; $N(N-1)/2$
$\mathbf{A}_N^{(15)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \\ \mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/4$; $N^2/4$	$\mathbf{A}_N^{(16)} = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_{N/2} & \mathbf{A}_{N/2} \\ \mathbf{A}_{N/2} & -\mathbf{A}_{N/2} \end{bmatrix}$	$N^2/4$; $N^2/4$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мы для многих приложений цифровой обработки данных.

Предлагаемый набор матричных эталонов является основой предлагаемого подхода к конструированию быстрых алгоритмов, который будет описан в следующем разделе статьи.

3. Суть предлагаемого подхода

Первым шагом развиваемого подхода к конструированию быстрых алгоритмов вычисления векторно-матричных произведений является поиск в исходной матрице-смножителе фрагментов (подматриц), взаимное расположение которых или композиция элементов внутри фрагментов, соответствует одному из эталонов, приведенных в *таблице 1*. К счастью, матрицы, которые встречаются в задачах цифровой обработки сигналов, как раз и обладают такими специфическими структурами или же их структуры можно легко модифицировать и свести к эталонным структурам путем переупорядочивания их строк или столбцов. Может однако оказаться, что даже применение упомянутых трюков не позволит сразу получить желаемую структуру матрицы. Тогда можно, к примеру, попробовать представить исходную матрицу в виде суммы нескольких (как правило двух или трех) матриц и затем искать удачные решения для каждой из матриц-слагаемых отдельно.

Можно также поделить матрицу на отдельные блоки и искать способы сокращения сложности вычислений в каждом таком блоке, используя при необходимости вышеперечисленные трюки, а затем просуммировать соответствующие результаты вычислений. Многое здесь зависит от интуиции, изобретательности разработчика, а также удачного выбора способа первоначальной модификации исходной матрицы, поскольку вариантов в результате такого выбора может появиться сразу несколько. Именно поэтому процесс разработки быстрого алгоритма можно без преувеличения назвать искусством.

Введем минимальный набор обозначений и несколько вспомогательных матриц, которые понадобятся для дальнейшего изложения материала [13, 14].

Пусть

$I_{M \times N}$ – матрица размера $M \times N$, целиком состоящая из единиц;

$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ – матрица Адамара второго порядка;

I_N – единичная матрица порядка N ;

знаками “ \otimes ”, “ \oplus ” соответственно обозначены операции тензорного произведения и прямой суммы матриц [15].

Кроме того, нам понадобятся следующие матрицы:

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \bar{I}_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \bar{I}_{1 \times 2} = [1 \mid -1], T_{3 \times 2}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 3}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_{3 \times 2}^{(2)} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 3}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, T_{3 \times 2}^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \tilde{T}_{3 \times 2}^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 3}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \tilde{T}_{3 \times 2}^{(3)} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, T_{3 \times 2}^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 3}^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, T_2^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, T_2^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_2^{(3)} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 4}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{2 \times 4}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

С учетом введенных обозначений, а также вспомогательных матричных конструкций, можно определить базовый набор алгоритмических решений, позволяющих вычислять векторно-матричные произведения для всех перечисленных в *таблице 1* эталонных матричных структур с пониженной вычислительной сложностью. В *таблице 2* представлены оптимизированные вычислительные процедуры для всех перечисленных в *таблице 1* эталонных матриц.

Используя разработанные процедуры, можно предложить достаточно универсальный набор приемов, применение которых позволяет синтезировать быстрый алгоритм вычисления векторно-матричных произведений.

4. Пример разработки быстрого алгоритма

Рассмотрим синтез быстрого алгоритма вычисления векторно-матричного произведения для матрицы следующего вида:

$$A_8^{(0)} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} a & b & c & d & e & f & k & l \\ b & a & d & c & f & e & l & k \\ c & d & a & b & k & l & e & f \\ d & c & b & a & l & k & f & e \\ \hline m & n & i & p & a & b & c & d \\ n & m & p & i & b & a & d & c \\ i & p & m & n & c & d & a & b \\ p & i & n & m & d & c & b & a \end{array} \right],$$

Задача состоит в том, чтобы сконструировать эффективный алгоритм умножения этой матрицы на вектор-столбец данных $X_{N \times 1} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$, т.е. вычислить

$$Y_{8 \times 1} = A_8^{(0)} X_{8 \times 1} \quad (1)$$

где $Y_{N \times 1} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ – вектор-столбец произведения. В качестве критерия эффективности алгоритма в данном случае примем количество арифметических операций, необходимых для вычисления (1).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Таблица 2
Оптимизированные вычислительные процедуры

$Y_{N \times 1}^{(1b)} = (T_{2 \times 4}^{(2)} \otimes I_{N/2})(A_{N/2} \oplus B_{N/2} \oplus C_{N/2} \oplus D_{N/2})(T_{4 \times 2}^{(2)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(2)} = (T_{2 \times 3}^{(1)} \otimes I_{N/2})(A_{N/2} \oplus B_{N/2} \oplus C_{N/2})(T_{3 \times 2}^{(1)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(3)} = (T_{2 \times 3}^{(2)} \otimes I_{N/2})(A_{N/2} \oplus C_{N/2} \oplus B_{N/2})(T_{3 \times 2}^{(2)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(4)} = (T_{2 \times 3}^{(3)} \otimes I_{N/2})[(C_{N/2} - A_{N/2}) \oplus (B_{N/2} - A_{N/2}) \oplus A_{N/2}](T_{3 \times 2}^{(3)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(5)} = (T_{2 \times 3}^{(3)} \otimes I_{N/2})[(C_{N/2} - A_{N/2}) \oplus (A_{N/2} + B_{N/2}) \oplus (-A_{N/2})](T_{3 \times 2}^{(4)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(6)} = (T_{2 \times 3}^{(4)} \otimes I_{N/2})[(A_{N/2} - B_{N/2}) \oplus (-A_{N/2} - B_{N/2}) \oplus (B_{N/2})](T_{3 \times 2}^{(5)} \otimes I_{N/2})X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(7)} = (H_2 \otimes I_{N/2}) \frac{1}{2} [(A_{N/2} + B_{N/2}) \oplus (A_{N/2} - B_{N/2})] (H_2 \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(8)} = (\bar{I}_2 \otimes I_{N/2}) (H_2 \otimes I_{N/2}) \frac{1}{2} [(A_{N/2} + B_{N/2}) \oplus (A_{N/2} - B_{N/2})] (H_2 \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(9)} = (T_{2 \times 2}^{(2)} \otimes I_{N/2}) [(A_{N/2} - B_{N/2}) \oplus B_{N/2}] (T_{2 \times 2}^{(1)} \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(10)} = (T_{2 \times 2}^{(3)} \otimes I_{N/2}) [(A_{N/2} + B_{N/2}) \oplus B_{N/2}] (T_{2 \times 2}^{(1)} \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(11)} = (A_{N/2} \oplus B_{N/2}) (H_2 \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(12)} = (I_{2 \times 1} \otimes I_{N/2}) (I_{1 \times 2} \otimes I_{N/2}) (A_{N/2} \oplus B_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(13)} = (A_{N/2} \oplus B_{N/2}) (I_{2 \times 1} \otimes I_{N/2}) (I_{1 \times 2} \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(14)} = (H_2 \otimes I_{N/2}) (A_{N/2} \oplus B_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(15)} = (I_{2 \times 1} \otimes I_{N/2}) A_{N/2} (I_{1 \times 2} \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$
$Y_{N \times 1}^{(16)} = (\bar{I}_{2 \times 1} \otimes I_{N/2}) A_{N/2} (\bar{I}_{1 \times 2} \otimes I_{N/2}) X_{N \times 1}$

Нетрудно убедиться, что для непосредственного вычисления векторно-матричного произведения в соответствии с выражением (1) требуется выполнить 64 умножения и 56 сложений. Попытаемся найти алгоритмическое решение, которое бы позволило существенно сократить по крайней мере количество умножений.

Можно заметить, что матрица A_8 имеет специфическую блочную структуру:

$$A_8^{(0)} = \begin{bmatrix} A_4^{(1)} & B_4^{(1)} \\ C_4^{(1)} & A_4^{(0)} \end{bmatrix}$$

где

$$A_4^{(1)} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ b & a & d & c \\ c & d & a & b \\ d & c & b & a \end{bmatrix}, B_4^{(1)} = \begin{bmatrix} e & f & k & l \\ f & e & l & k \\ k & l & e & f \\ l & k & f & e \end{bmatrix}, C_4^{(1)} = \begin{bmatrix} m & n & i & p \\ n & m & p & i \\ i & p & m & n \\ p & i & n & m \end{bmatrix}$$

Композиция блоков соответствует эталонной структуре, представленной в таблице 1 под номером 4. Это означает, что количество арифметических операций при вычислении векторно-матричного произведения можно сократить.

Рационализированная процедура рассматриваемого произведения имеет следующий вид:

$$Y_{8 \times 1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_4 & I_4 & I_4 \\ I_4 & \mathbf{0}_4 & I_4 \end{bmatrix} \text{diag} \begin{bmatrix} C_4^{(1)} - A_4^{(1)} \\ B_4^{(1)} - A_4^{(1)} \\ A_4^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 & \mathbf{0}_4 \\ \mathbf{0}_4 & I_4 \\ I_4 & I_4 \end{bmatrix} X_{8 \times 1},$$

$$C_4^{(1)} - A_4^{(1)} = \begin{bmatrix} m-a & n-b & i-c & p-d \\ n-b & m-a & p-d & i-c \\ i-c & p-d & m-a & n-b \\ p-d & i-c & n-b & m-a \end{bmatrix},$$

$$B_4^{(1)} - A_4^{(1)} = \begin{bmatrix} e-a & f-b & k-c & l-d \\ f-b & e-a & l-d & k-c \\ k-c & l-d & e-a & f-b \\ l-d & k-c & f-b & e-a \end{bmatrix},$$

С учетом введенных ранее обозначений вычислительная процедура (1) может быть записана в более компактной форме:

$$Y_{8 \times 1} = \Xi_{8 \times 12} D_{12}^{(1)} \Xi_{8 \times 12} X_{8 \times 1} \quad (2)$$

где $D_{12}^{(1)} = (C_4^{(1)} - A_4^{(1)}) \oplus (B_4^{(1)} - A_4^{(1)}) \oplus A_4^{(1)}$,

$$\Xi_{12 \times 8} = (T_{2 \times 3}^{(3)} \otimes I_4) = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ \hline 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \end{bmatrix},$$

$$\Xi_{8 \times 12} = (T_{3 \times 2}^{(3)} \otimes I_4) = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}.$$

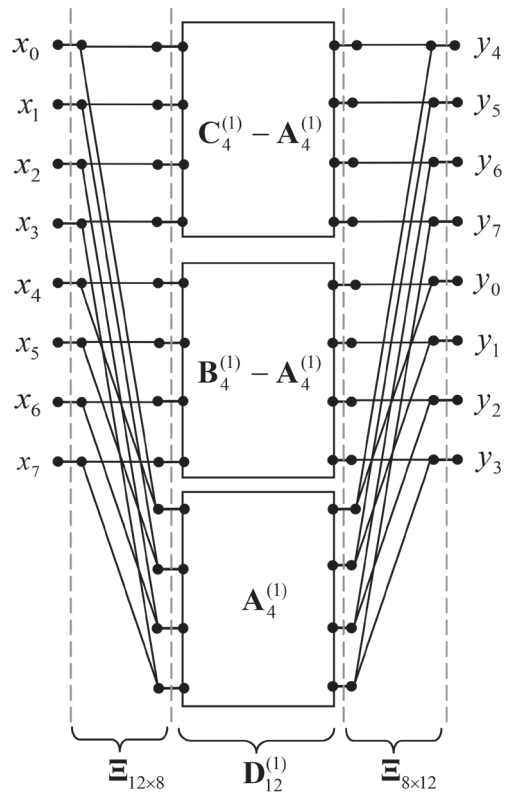


Рис. 1. Графическая интерпретация организации вычислительного процесса умножения матрицы A_8 на вектор $X_{8 \times 1}$ на первом этапе синтеза алгоритма

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$A_2^{(2)} + B_2^{(2)} = H_2 \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c|c} e-a+k-c+f-b+l-d & 0 \\ \hline 0 & e-a+k-c-f+b+l-d \end{array} \right] H_2 \quad (9)$$

$$A_2^{(2)} - B_2^{(2)} = H_2 \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c|c} e-a+k+c+f-b-l+d & 0 \\ \hline 0 & e-a-k+c-f+b+l-d \end{array} \right] H_2 \quad (10)$$

$$A_2^{(3)} + B_2^{(3)} = H_2 \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c|c} a+c+b+d & 0 \\ \hline 0 & a+c-b-d \end{array} \right] H_2 \quad (11)$$

$$A_2^{(3)} - B_2^{(3)} = H_2 \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c|c} a-c+b-d & 0 \\ \hline 0 & a-c-b+d \end{array} \right] H_2 \quad (12)$$

Подставляя (7)-(12) в (6), получим финальную вычислительную процедуру быстрого алгоритма вычисления векторно-матричного произведения:

$$Y_{8 \times 1} = \Xi_{8 \times 12} W_{12}^{(0)} W_{12}^{(1)} D_{12}^{(3)} W_{12}^{(1)} W_{12}^{(0)} \Xi_{12 \times 8} X_{8 \times 1} \quad (13)$$

где

$$D_{12}^{(3)} = \frac{1}{4} \text{diag}(s_0, s_1, \dots, s_{11})$$

$$\begin{aligned} s_0 &= m-a+i-c+n-b+p-d, \quad s_1 = m-a+i-c-n+b-p+d, \\ s_2 &= m-a-i+c+n-b-p+d, \quad s_3 = m-a-i+c-n+b+p-d, \\ s_4 &= e-a+k-c+f-b+l-d, \quad s_5 = e-a+k-c-f+b-l+d, \\ s_6 &= e-a-k+c+f-b-l+d, \quad s_7 = e-a-k+c-f+b+l-d, \quad s_8 = a+c+b+d, \\ s_9 &= a+c-b-d, \quad s_{10} = a-c+b-d, \quad s_{11} = a-c-b+d. \end{aligned}$$

$$W_{12}^{(0)} = I_8 \otimes H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & & & & \\ & 1 & -1 & & & & & \\ & & 1 & 1 & & & & \\ & & & 1 & -1 & & & \\ & & & & 1 & 1 & & \\ & & & & & 1 & -1 & \\ & & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

На рисунке 3 представлена графо-структурная модель, описывающая алгоритмическую структуру рационализированного вычислительного процесса, реализуемого в соответствии с процедурой (13).

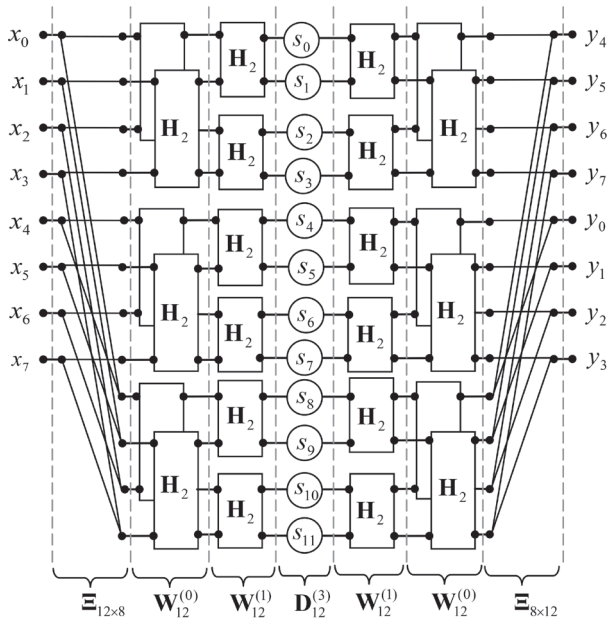


Рис. 3. Графическая интерпретация организации вычислительного процесса умножения матрицы A_8 на вектор $X_{8 \times 1}$ на третьем этапе синтеза алгоритма

Итак, мы синтезировали алгоритм умножения заданной матрицы на вектор для реализации ко-

торого необходимо выполнить всего 12 умножений (вместо 64) и 116 сложений (вместо 56). Однако, если присмотреться к соотношениям для $\{s_i\}, i = 0, 1, \dots, 11$, можно заметить, что в этих соотношениях можно выделить повторяющиеся алгебраические суммы. Это значит, что число операций сложения, необходимых для реализации алгоритма, может быть сокращено. Опуская достаточно очевидные рассуждения, можем записать процедуру вычисления элементов $\{s_i\}$ диагональной матрицы, в которой устранена необходимость многократного вычисления одинаковых алгебраических сумм:

$$S_{12 \times 1} = \frac{1}{4} W_{12}^{(1)} \tilde{W}_{12}^{(1)} \tilde{W}_{12}^{(0)} A_{12 \times 1} \quad (14)$$

где

$A_{12 \times 1} = [a, b, c, d, e, f, k, l, m, n, i, p]^T$ – вектор, составленный из расположенных в алфавитном порядке всех неповторяющихся элементов матрицы $A_8^{(0)}$.

$$\tilde{W}_{12}^{(0)} = \begin{bmatrix} -1 & & & & & & & & & & & \\ & -1 & & & & & & & & & & \\ & & -1 & & & & & & & & & \\ & & & -1 & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{W}_{12}^{(1)} = (H_2 \otimes I_2) \oplus (H_2 \otimes I_2) \oplus I_4 =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

Таким образом, в синтезированном алгоритме число сложений, необходимых для вычисления векторно-матричного произведения уменьшилось до 80.

Обобщая предлагаемые в рамках описываемого подхода концептуальные принципы, положенные в основу развиваемого подхода, можно разработать инженерную методику конструирования быстрых алгоритмов вычисления векторно-матричных произведений. Однако обсуждение этой проблемы выходит за рамки тематики данной статьи.

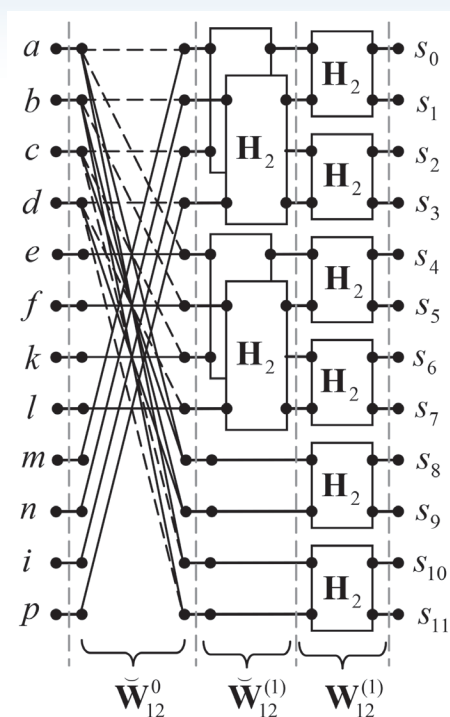


Рис. 4. Графическая интерпретация организации процесса вычисления элементов вектора $S_{12 \times 1}$ в соответствии с процедурой (14)

5. Заключение

В публикации обсуждается простой и не требующий специальных знаний подход [13-14] к разработке быстрых алгоритмов вычисления векторно-матричных произведений. Главное внимание сосредоточено именно на этом типе операций, поскольку необходимость быстрого вычисления векторно-матричных произведений с различными матричными ядрами возникает при решении огромного количества прикладных задач, связанных с цифровой обработкой данных в радиолокации, навигации, телекоммуникации, распознавании образов, анализе сцен, машинной графике и т. д.

Не претендуя на полную универсальность, предлагаемый подход все-таки обладает достаточным набором свойств, позволяющих унифицировать, формализовать и даже автоматизировать в интерактивном режиме разработку быстрых алгоритмов [16].

С помощью предлагаемого подхода был разработан целый ряд эффективных алгоритмических решений, позволяющих значительно сократить время выполнения вычислений при решении различных прикладных задач и/или упростить структуры специализированных вычислителей [17-31].

Подытоживая сказанное, хотелось бы еще раз подчеркнуть, что процесс конструирования быстрых алгоритмов является достаточно непро-

стым и трудоемким. Особенно это становится ощутимым в случае матриц больших размеров. И если, к примеру, в целях сведения структуры матрицы к одному из эталонов возникает необходимость переупорядочивания строк и/или столбцов матрицы, то полный перебор вариантов может потребовать столько времени, что изначально благое намерение просто потеряет всякий смысл. Отмеченное служит обоснованием целесообразности дальнейшей разработки интерактивной автоматизированной системы конструирования быстрых алгоритмов, в которой с одной стороны для корректировки, принятия решений и выбора направлений автоматического поиска эффективных решений будет использоваться опыт и интуиция разработчика, а с другой стороны, во избежание необходимости полного перебора вариантов и для сокращения трудоемкости задания, будут применяться методы и программные средства направленного поиска, основанные, например, на мягких вычислениях.

Литература

1. Гашков С. Б. Занимательная компьютерная арифметика. Быстрые алгоритмы операций с числами и многочленами / Гашков С.Б. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 224 с.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.
3. Карацуба А., Офман Ю. Умножение многозначных чисел на автоматах // Доклады Академии Наук СССР, 1962. Т. 145, № 2.
4. Гриценко С.А. Научные достижения Анатолия Алексеевича Карацубы. / С.А. Гриценко, Е.А. Карацуба, М.А. Королёв, И.С. Резвякова, Д.И. Толев, М.Е. Чанга.// Совр. пробл. математики: Математика и информатика, 2012. Т.16. С. 7-30.
5. Кули, Льюис, Уэлч. Исторические замечания относительно быстрого преобразования Фурье, ТИИЭР, 1967. Т.55, № 10. С. 18-21.
6. Нуссбаумер Г., Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
7. Хуанг Т. С., Эклунд Дж. О., Нуссбаумер Г. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений, 1984. 224 с.
8. Макклеллан Дж.Г., Рейдер Ч.М., Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 264 с.
9. Рабин М. О., Виноград Ш., Быстрое вычисление многочленов с предварительной рациональной обработкой коэффициентов, Математика, 1974. Т.18. Вып.4. С. 98-120.
10. Strassen V., Gaussian Elimination is not Optimal // Numer. Math — Springer Science+Business Media, 1969. — vol. 13, no. 4. — pp. 354-356.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

11. Окулов С. М. Алгоритмы компьютерной арифметики // С.М. Окулов, А.В. Лялин, О.А. Пестов, Е.В. Разова. 2-е изд. (эл.). М.: Лаборатория знаний, 2015. 288 с.
12. Cariow A., Cariowa G., Chicheva M. Hardware-Efficient Schemes of Quaternion Multiplying Units for 2D Discrete Quaternion Fourier Transform Processors, *Measurement Automation Monitoring*, 2017, vol. 63, no 06, pp. 201-208.
13. Cariow A., Strategies for the synthesis of fast algorithms for the computation of the matrix-vector products, *Journal of Signal Processing Theory and Applications*, 2014, vol. 3 No. 1 pp. 1-19.
14. Ғарюв А. Алгоритмические аспекты рационализации вычислений в цифровом przetwarzaniu sygnałów. Wydawnictwo Uczelniane ZUT/ PPH ZAPOL Dmochowski Sobczyk Spółka Jawna, 2011. – 230 с.
15. Steeb W. H., Hardy Y., *Matrix Calculus and Kronecker Product: A Practical Approach to Linear and Multilinear Algebra*, World Scientific Publishing Company; 2 edition, 324 pages, (March 24, 2011).
16. Andreatto B. Cariow A., Automatic generation of fast algorithms for matrix-vector multiplication, *International Journal of Computer Mathematics*, 2018, vol. 96, no. 3, pp. 626-644.
17. Gliszczyński M., Ғарюв А. Szybki algorytm splotu kołowego dla $N = 2m$. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2009, 55, nr 8, pp. 566-568.
18. Ғарюв А., Ғарюва Г., Аспекты алгоритмической редукции числа блоков множителей в układzie do obliczania iloczynu dwóch kwaternionów, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 2010, 56, nr 7 str. 688-69.
19. Ғарюв А., Ғарюва Г., Аспекты алгоритмической организации единицы процессорной до мнoжения чисел Cayleya, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, 2010, 51, Nr 11, str. 104-108.
20. Царёв А.П., Царёва Г.Д. Алгоритм умножения октонионов. *Известия вузов // Радиоэлектроника*, 2012. Т.55. №10., С. 44-54.
21. Cariow A., Cariowa G., An algorithm for complex-valued vector-matrix multiplication. *Electrical Review*, 2012, R 88, No 10b, 213-216.
22. Majorkowska-Mech D., Cariow A., An algorithm for discrete fractional Hadamard transform with reduced arithmetical complexity. *Electrical Review*, 2012, R 88, No 11a, 70-76.
23. Cariow A., Gliszczyński M., Fast algorithms to compute matrix-vector products for Toeplitz and Hankel matrices. *Electrical Review*, 2012, R 88, No 8, 166-171.
24. Cariow A., Cariowa G., An algorithm for fast multiplication of sedenions. *Information Processing Letters*, 2013, 113, 324-331.
25. Cariow A., Cariowa G., An algorithm for multiplication of Dirac numbers. *Journal of Theoretical and Applied Computer Science*, 2013. 7, no. 4, 26-34.
26. Cariow A., Cariowa G., Algorithmic tricks for reducing the complexity of FDWT/IDWT basic operations implementation. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2014. 6, no. 10, 1-9.
27. Cariow A. Cariowa G., An algorithm for fast multiplication of Pauli numbers. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 2015. pp. 1-11.
28. Cariow A., Majorkowska-Mech D., Fast algorithm for discrete fractional Hadamard transform. *Numerical Algorithms*, 2015, vol. 68, no.3, pp. 585-600.
29. Majorkowska-Mech D., Cariow A. A Low-Complexity Approach to Computation of the Discrete Fractional Fourier Transform, *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2017 v. 36, no. 204. pp. 1-27.
30. Cariow A., Cariowa G., On the Multiplication of Biquaternions, *Soft Computing in Computer and Information Science: Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 342, 2015, pp. 423-434.
31. Cariow A., Cariowa G., Witczak M., A FPGA-Oriented Fully Parallel Algorithm for multiplying dual quaternions, *Measurement Automation Monitoring*, No 7, pp. (2015). *Measurement Automation Monitoring*, Jul. 2015, vol. 61, no. 07 pp. 370-372.

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 621.355, 621.365

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ОБЪЕКТОВ

SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLIES OF MOBILE SYSTEMS FOR ELECTRIC HEATING OF OBJECTS

Евгений Михайлович Ананьев

*почетный работник науки и техники РФ
кандидат технических наук, доцент
член-корреспондент АИО*

Первый Вице-президент – Первый заместитель
генерального директора МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: e.ananev@iifmail.ru

Владимир Петрович Ситников

*инженер-конструктор
АО «НПО «Отечественные технологии,
промышленный дизайн и инжиниринг»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: sitnikovv@list.ru*

Олег Николаевич Андрух

*почетный работник науки и техники РФ
кандидат технических наук, доцент*

Генеральный директор
АО «НПО «Отечественные технологии,
промышленный дизайн и инжиниринг»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: oandruh@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ проблемы импортозамещения в электротехнической промышленности РФ. Предложено решение проблемы импортозамещения с привлечением предприятий оборонно-промышленного комплекса, выпускающих инновационную наукоемкую продукцию двойного назначения с высокой добавленной стоимостью. В качестве примера наукоемкой продукции представлена мобильная система электрообогрева на основе эластичных нагревательных элементов, выполненных из металлизированных полимерных нитей. Проанализированы характеристики аккумуляторных батарей различного типа. В качестве автономного источника питания мобильной системы электрообогрева обосновано применение литий-ионных аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: импортозамещение, автономные источники питания, мобильные системы электрообогрева, аккумуляторные батареи, типы и технические характеристики аккумуляторных батарей, литий-ионные аккумуляторные батареи.

Summary

The problem of import substitution in the electrotechnical industry of the Russian Federation is analyzed. The proposal to solve the problem of import substitution with the involvement of enterprises of the military-industrial complex, producing innovative high-tech dual-use products. As an example of high-tech products, a mobile electric heating system based on elastic heating elements made of metallized polymer filaments is presented. The characteristics of different types of accumulator batteries are analyzed. The use of lithium-ion batteries is justified as an Autonomous power source of the mobile electric heating system.

Keywords: import substitution, electronic components, selection, decisive rule, probabilities of mistakes, borders of admissible change of parameters.

Важной составной частью современных мобильных электронных и электротехнических устройств являются автономные источники питания на основе аккумуляторных батарей (АБ). Технические характеристики АБ (масса, емкость, время разряда, число циклов заряд/раз-

ряд и т.д.) во многом определяют возможности эксплуатируемых устройств.

Мощным толчком совершенствования традиционных и развития перспективных аккумуляторных батарей является рост популярности электронных гаджетов, электроавтомобилей и

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

иных транспортных средств с автономной электрической тягой.

Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (МОУ «ИИФ») осуществляет разработку и производство инновационных мобильных систем электрообогрева, оснащенных автономными источниками питания, таких, как [4], костюм с электрообогревом специалиста (в том числе водолаза), осуществляющего деятельность в условиях низкой температуры окружающей среды; эвакуационный термомешок; автономная система обогрева для перелива инфузионных растворов (капельница) и др.

Важнейшей составной частью всех систем электрообогрева является источник питания. На обоснование типа аккумуляторных батарей и их предприятия-изготовителя влияет ряд факторов: научно-технический, экологический, социально-политический.

Экологический фактор выражается в необходимости учета требований технического законодательства Евразийского экономического союза (ЕАЭС) к выпускаемой продукции. Российская Федерация, выстраивая рыночную экономику, гармонизировала техническое законодательство с международным правом введением в действие федерального закона «О техническом регулировании» от 27.12.2002 №184-ФЗ. Целью технического регулирования является защита жизни и здоровья населения, окружающей среды от негативных производственных факторов, обеспечение безопасности выпускаемой продукции.

Для ограничения применения опасных веществ в электронном и электротехническом оборудовании в Европейском союзе была принята Директива 2002/95/EC Restriction of Hazardous Substances (RoHS) со сроком вступления в действие 01.06.2006, установившая точные пределы предельно допустимых концентраций некоторых веществ в оборудовании (таблица 1). В последующем данная Директива была актуализирована в документе 2011/65/EU Directive (RoHS2).

В 2016 году на основе Директивы RoHS2 был принят технический регламент ЕАЭС «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники» [7], регламентировавший те же требования к опасным веществам и их концентрациям, что и в европейской Директиве (таблица 1).

Введение в действие Директи-

вы RoHS с жесткими ограничениями по применению кадмия привело к падению производства никель-кадмиевых батарей вдвое с сохранением тренда на последующее сокращение их производства. Эта же тенденция ярко наблюдается и в Российской Федерации.

Социально-политический фактор обусловлен деятельностью предприятий страны в условиях западных санкций и реализации национальной политики импортозамещения [1]. На рынке аккумуляторных батарей сложилась ситуация, когда четыре крупные транснациональные компании Johnson Controls, Exide Technologies, Delphi Corporation и East Menn Mfg осуществляют 90% мировых продаж аккумуляторов [9].

В 2014 году в Российской Федерации 95% рынка аккумуляторных батарей принадлежало зарубежным производителям [6]. С целью создания в РФ конкурентоспособной, устойчивой, структурно сбалансированной промышленности, способной к эффективному саморазвитию на основе интеграции в мировую технологическую среду, постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 №328 утверждена государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», сформированы планы импортозамещения по отраслям. В частности, приказ Минпромторга России № 653 от 31.03.2015 «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли энергетического машиностроения, кабельной и электротехнической промышленности РФ» устанавливает необходимость снижения доли импорта аккумуляторных батарей к 2020 году с 95% до 60%.

В связи с приближением сроков выполнения «Государственной программы вооружений 2020» в краткосрочной перспективе прогнозируется со-

Таблица 1

Правовые документы по ограничению применения опасных веществ в Евросоюзе и ЕАЭС

Правой документ	Ограничение в применении опасных веществ в электронных и электротехнических устройствах
Директива EC Restriction of Hazardous Substances 2002/95/EC (RoHS); Директива EC 2011/65/EU от (RoHS2).	- свинец; - ртуть; - кадмий; - шестивалентный хром; - полибромированные бифенилы; - полибромированные дифениловые эфиры
Технический регламент ЕАЭС «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники»	- свинец; - ртуть; - кадмий; - шестивалентный хром; - полибромированные бифенилы; - полибромированные дифениловые эфиры

Таблица 2
Сравнительные характеристики аккумуляторных батарей [10]

Характеристики	Типы АБ					
	NiCd	NiMH	Кислотные	Li-Ion	Li-Ion полимерные	Алкалиновые
Энергетическая плотность, Вт/кг	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80
Число циклов заряд / разряд до снижения емкости на 80%	1500	300-500	200-300	500-1000	300-500	50
Время быстрого заряда, ч	1	2-4	8-16	2-4	2-4	2-3
Саморазряд за месяц при комнатной температуре, %	20	30	5	10	10	0,3
Ток нагрузки относительно емкости(С): - пиковый - номинальный	20С 1С	5С до 0,5С	5С до 0,2С	>2С до 1С	>2С до 1С	0,5С 0,2С
Диапазон рабочих температур, °С	-40+60	-20+60	-20+60	-20+60	0+60	0+65

кращение финансирования по государственному оборонному заказу по статьям выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) и производства вооружений и военной техники (ВВТ) в интересах силовых ведомств России. Президент РФ ставит задачу диверсификации деятельности предприятий ОПК, стимулирование внутреннего спроса для продукции двойного назначения, наращивания экспортных поставок ВВТ. Предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России являются двигателем экономики страны, точками роста, основными инициаторами разработки и внедрения новых наукоемких технологий в производство. В построении несырьевой экономики государство делает существенную ставку на предприятия ОПК.

Организациям ОПК страны необходимо учесть печальный опыт диверсификации 90-х годов прошлого века. Рациональными направлениями диверсификации являются либо производство продукции двойного назначения, либо производство народнохозяйственной продукции с высокой добавленной стоимостью, на основе наукоемких технологий, по возможности с малой длительностью жизненного цикла.

Примером рациональной диверсификации деятельности МОУ «ИИФ» как предприятия ОПК является разработка и производство инновационных мобильных систем электрообогрева объектов военного и гражданского назначения.

Различные конструкции нагреваемых проводов на основе углеволокон и металлических проводов широко применяются в строительстве, нефтедобыче, других отраслях народного хозяй-

ства. МОУ «ИИФ» в качестве нагревательного элемента применяет инновационный провод, с жилой из искусственного волокна (полиамида, лавсана, арамида), на которую наносится тонкопленочное металлическое покрытие, с изоляцией на основе полиофелинов.

Применяемые нагреваемые провода предназначены для обогрева спецодежды, а также для изделий технического и бытового назначения с электрообогревом при постоянном напряжении от 3 до 36 В. Нагреваемые провода могут применяться для фиксированных и гибких (эластичных) нагревателей и эксплуатироваться в диапазоне температур от минус 50°С до плюс 40°С.

Научно-технический фактор, обуславливающий выбор типа аккумуля-

торных батарей, относится к традиционным аспектам и определяется уровнем достижений науки, техники и технологий в области разработки и производства АБ различных типов, функциональным назначением объекта, условиями эксплуатации объекта, текущими и перспективными требованиями потребителей и т.д.

К основным типам серийных аккумуляторных батарей относятся свинцово-кислотные, никель-кадмиевые (NiCd), никель-металлгидридные (NiMH), литий-ионные (Li-Ion), литий-полимерные, щелочные, серебряно-цинковые [3, 10]. Основные характеристики АБ данных типов представлены в *таблице 2*.

К аккумуляторным батареям в составе автономных систем электрообогрева предъявляется ряд жестких требований:

- высокая плотность энергии;
- значительное количество циклов заряд/разряд;
- ограничения по габаритам и массе;
- надежность (в том числе длительный назначенный срок службы);
- работоспособность при любом положении в пространстве;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- герметичность;
- отсутствие газовыделений и др.

Анализ данных *таблицы 2*, а также работ [2, 8, 11, 12] показывает, что лучшей совокупностью характеристик для автономных систем электрообогрева обладают литий-ионные АБ. Ранние проблемы с взрыво- и пожаробезопасностью, отсутствием газовыделений Li-Ion аккумуляторных батарей успешно решены, в то время как габаритно-мас-

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

Таблица 3

Технические характеристики Li-ion аккумуляторных батарей АО «Энергия» [5]

Наименование	Номинальная емкость, А·ч	Номинальное напряжение, В	Рабочие температуры, °С	Количество циклов
2ЛИА-1,6	1,6	7,4	от -10 до +40	300
2ЛИА-4,1 2ЛИА-4,1	4	7,4	от -30 до +50	500
2ЛИА-4-2	4	7,4	от -30 до +50	500
2ЛИА-3	3	7,4	от -30 до +50	300
2ЛИА-8	8	3,7	от -10 до +40	300
2ЛИА-12	12	7,4	от -40 до +50	300
4ЛИА-2	2	14,8	от -40 до +50	300
4ЛИА-4,8	4,8	14,6	от -40 до +50	300
4ЛИА-7	7	14,8	от -40 до +50	300
4ЛИА-8,0	8	14,8	от -40 до +50	300
4ЛИА-9	9	14,8	от -40 до +50	300
4ЛИА-10	10	14,8	от -40 до +50	300

совые характеристики, емкость и энергетическая плотность имеют наилучшие значения в сравнении с АБ других типов. Интересны характеристики никель-кадмиевых АБ, обладающих высокими значениями количества циклов заряд / разряд (1500), широким диапазоном рабочих температур (от -400С до +600С), однако учет экологического фактора, связанного с законодательным ограничением в применении кадмия в электротехнических устройствах, позволяет сделать обоснованный выбор автономного источника питания мобильных СЭО в пользу литий-ионных АБ.

Основными производителями литий-ионных АБ в России являются ОАО «Аккумуляторная компания (АК) «Ригель» (Санкт-Петербург); ОАО «НИАИ «Источник» (Санкт-Петербург); ООО «НПО ССК» (Москва); АО «Энергия» (г.Елец); ООО «Литий-ионные технологии» (ООО «Лиотех», г.Новосибирск).

ООО «Лиотех» осуществляет выпуск литий-ионных АБ большой емкости для транспортных систем. Предприятия АК «Ригель», НИАИ «Источник», НПО ССК и АО «Энергия» выпускают литий-ионные АБ, сравнимые по характеристикам. Однако габаритно-массовые характеристики батарей АО «Энергия» предпочтительнее, положительным фактором является широкая линейка литий-ионных батарей данного предприятия, *таблица 3*.

Отечественные литий-ионные АБ в сравнении с зарубежными аналогами характеризуются рядом недостатков:

- высокой стоимостью;
- значительными габаритно-массовыми характеристиками;
- отсутствием у ряда модификаций АБ документов, подтверждающих положительные итоги процедуры подтверждения соответствия и др.

Отечественных производителей аккумуляторных батарей отличает консервативность конструк-

тивных решений; большое время реакции на запросы потребителей; недостаточное внимание разработке и производству сопутствующих устройств: в стране практически не выпускаются зарядные устройства, блоки индикации уровня заряда, специальные контактные группы (разъемы, в том числе пылевлагозащищенные).

Не смотря на существенные сложности в области разработки и производ-

ства отечественных литий-ионных АБ, существует объективная уверенность в изменении негативного тренда. Огромную роль в этом сыграет сегмент рынка B2B (business to business, бизнес для бизнеса). Одним из положительных примеров является разработка АО «Энергия» новой литий-ионной аккумуляторной батареи 4-3ЛИА-12 (*таблица 4*) по техническому заданию предприятия-потребителя МОУ «ИИФ». Батарея создана на основе имеющейся линейки литий-ионных АБ (*таблица 3*).

Таблица 4

Характеристики аккумуляторной батареи 4-3ЛИА-12

Наименование	Значение
Номинальная емкость, А·ч	12
Номинальное напряжение, В	14,8
Конечное напряжение при разряде, В	12,0+0,2
Масса батареи, не более, кг	1,4
Срок службы, не менее, лет	5
Наработка в пределах срока службы, циклов	300

АБ 4-3ЛИА-12 оснащена модулем контроля и управления, который обеспечивает защиту АБ от короткого замыкания во внешней цепи, защиту по току, перезаряду, переразряду, балансировку по току и напряжению. Аккумуляторные батареи 4-3ЛИА-12 хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации в составе опытных образцов автономных систем электрообогрева. Область применения и объемы продаж аккумуляторных батарей 4-3ЛИА-12 могут существенно увеличены при оперативной доработке батареи по следующим направлениям: оснащение батареи корпусом, выдерживающим избыточное давление 10÷15 атмосфер; комплектование батареи пылевлагозащитными разъемами; обеспечение герметичности корпуса от проникновения влаги; оснащение батареи индикатором уровня заряда. Важно решение проблемы разработки и производства широкой линейки отечественных одиночных и групповых зарядных устройств.

Таким образом, при обосновании выбора ли-

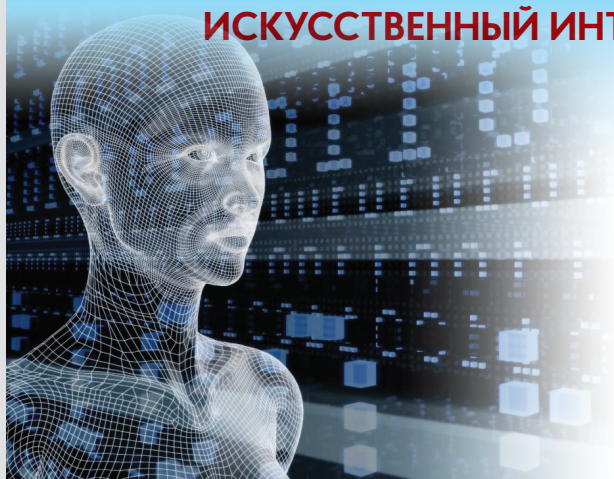
ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

тий-ионных аккумуляторных батарей в качестве автономного источника питания для инновационной наукоемкой продукции (мобильных систем электрообогрева объектов различного назначения) необходимо учитывать не только уровень достижений науки, техники и технологий в области разработки и производства АБ (научно-технический фактор). Важное значение имеет решение проблемы импортозамещения, стимулирование отечественных разработчиков и производителей электротехнической продукции с использованием потенциала взаимосвязей в системе «бизнес для бизнеса» (социально-политический фактор). Кроме того, перспективные электротехнические устройства невозможно разрабатывать и производить без учета требований международного и национального законодательства в области технического регулирования (экологический фактор).

Литература

1. Андрух О.Н., Безродный Б.Ф., Майоров С.А., Смирнов Д.В., Определение границ допустимого изменения параметров для селекции импортозамещающих электронных компонентов // Известия Института инженерной физики, 2016. № 3 (41). С.2-6.
2. Иванов С.А., Асадов Д.Г. Анализ рынка и тенденции развития литий-ионных аккумуляторов и электромобилей // Международный технико-экономический журнал. 2011. № 1. С. 119-122.
3. Курзуков Н. И., Ягнятинский В. М. Аккумуляторные батареи. Краткий справочник. М.: За рулем, 2008. 88 с.
4. Мурашов А.Г., Руднев Д.С., Бутранов А.С. Применение инновационных систем локального обогрева в условиях низких температур // Известия Института инженерной физики, 2018. №1 (47). С.75-77.
5. Официальный сайт АО «Энергия» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ao-energiya.ru/> (дата обращения: 09.03.2018).
6. Приказ Минпромторга России от 31.03.2015 №653 (ред. от 30.11.2016) «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли энергетического машиностроения, кабельной и электротехнической промышленности Российской Федерации».
7. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 18.10.2016 №113 «О техническом регламенте Евразийского экономического союза «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники».
8. Ситников А.В., Масленникова С.И. Аккумуляторные батареи носимых электронных устройств // Радиостроение. 2017. № 5. С. 52-72.
9. Тюрин Д.В., Стрельников М.П. Зарядись на все 100%! (маркетинговое исследование рынка автомобильных аккумуляторных батарей, Москва) // Практический маркетинг. 2010. № 11. С. 25-33.
10. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003. 224 с.
11. Handbook of Batteries / Edited by Linden D., Reddy T. B. Mc Graw-Hill, 2004.
12. Zhang D., Haran B. S., Durairajan A. et al. Studies on capacity fade of lithium-ion batteries // J. of Power Sources. 2000. V. 91. № 2.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА



УДК 623

О КОГНИТИВНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ, ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ И ПСИХИКЕ РОБОТОВ

ABOUT COGNITIVE MODELING, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND PSYCHE OF ROBOTS

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
член Научного совета по методологии
искусственного интеллекта РАН
Вице-президент по инновационным проектам
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская область,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifmail.ru

Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская область,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifmail.ru

Аннотация

В статье применительно к созданию искусственного интеллекта (ИИ) рассматриваются направления, связанные с исследованием когнитивных состояний, процессов и свойств живых организмов, приданием искусственно созданным человеком объектам способности самостоятельно познавать и изменять окружающий мир. Показываются недостатки и ограничения современных сетей глубокого обучения при решении ими задач распознавания. Обосновывается необходимость придания искусственному объекту соответствующей уровню решаемых задач психики для появления «настоящего» ИИ. Даются определения и раскрываются понятия интеллект, робот, сознание. Отмечается важность топологичности восприятия и ассоциативности памяти, обязательности наличия генетически задаваемого видового опыта и программ развития в онтогенезе. Определяется место интеллекта и сознания как иерархически связанных «менеджеров» эволюционирующей психики. Выделяется проблема «загрузки ценностей» в саморазвивающийся ИИ.

Ключевые слова: моделирование, междисциплинарность, естественный интеллект, искусственный интеллект, психика, распознавание, сознание, робот, нейронные сети, топологичность, ассоциативность, базисность, саморазвитие, дружелюбность искусственного интеллекта, проблема «загрузки ценностей».

Summary

In the article with reference to the creation of artificial intelligence (AI), the directions related to the study of cognitive states, processes and properties of living organisms, the ability to creatively create human beings the ability to independently learn and change the world around them are examined. The shortcomings and limitations of modern deep learning networks are revealed when they solve the recognition problems. The author substantiates the necessity of giving to the artificial object the corresponding level of solved problems of the psyche for the appearance of "real" AI. Definitions and concepts of intellect, robot, and consciousness are given. The importance of topology of perception and associativity of memory, the mandatory availability of genetically specified species experience and development programs in ontogeny is noted. The place of intellect and consciousness as hierarchically connected "managers" of the evolving psyche is determined. The problem of "loading values" in a self-developing AI is highlighted.

Keywords: modeling, interdisciplinarity, natural intelligence, artificial intelligence, psyche, recognition, consciousness, robot, neural networks, topology, associativity, basicity, self-development, friendliness of artificial intelligence, the problem of "loading values."

Очевидны два генеральных научно-практических направления, где когнитивное моделирование (КМ) востребовано.

Во-первых, направление, связанное с исследованием когнитивных состояний, процессов, свойств (КСПС) в живых системах (как в отдельных особях,

¹ Статья подготовлена для конференции «Искусственный интеллект: проблемы и пути их решения – 2018», 14-15 марта, КВЦ «Патриот».

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

так и в их объединениях). Речь идет о структурах и механизмах реализации отдельных КСПС, структурах и механизмах интеграции КСПС с формированием эмерджентных качеств организма, развитии организма как объединение генетического и индивидуального опыта, механизмах принятия решений, реализации и активации творческой деятельности. Конечно, в первую очередь, эти исследования касаются человека, моделирования его познавательной деятельности с целью понимания и описания (формализации) того, как она реализуется, какие преобразования сигналов при этом происходят в головном мозге и других отделах нервной системы, каким образом взаимодействуют между собой различные системы организма, как организм взаимодействует с внешним миром и самим собой. Это моделирование развития человека, процессов становления и развития его способностей познавать мир, методов повышения эффективности его мышления. Это построение моделей принятия человеком решений в различных ситуациях при различной исходной информации.

Во-вторых, направление, связанное с приданием человеком искусственно созданным им объектам способности самостоятельно познавать (посредством тех или иных действий) и изменять окружающий мир. При этом можно говорить о ряде подходов:

● наиболее распространенном ориентированном на конечный результат – желаемую функцию – *функциональном подходе* – как следствии незнания с достаточной полнотой того, как все это происходит в живом при желании исследователей и их (само) уверенности в способности создать подобное природному и «даже лучше». Такой функциональный подход в прикладной науке до последнего времени был основным, поскольку он давал полезные практические результаты². И хотя эти результаты касались всего лишь некоторых частных приложений использования машинных алгоритмов для обработки данных, эти алгоритмы стали связывать и даже часто отождествлять с тем, что получило название искусственный интеллект (ИИ);

● *бионическом подходе*, все более пристальное знакомство с которым подтверждает уникальность (по своим возможностям) природных конструкций. Большинство того, что человек изобретает (включая, кстати, колесо) уже в природе есть;

● интересном *эволюционном подходе*, тем более

что его реализация в контролируемых человеком условиях возможна в ускоренном варианте;

● перспективном *комбинированном подходе*, соединяющем достоинства и устраняющем недостатки вышеназванных подходов.

Пока превалирует ориентация на прагматичный конечный результат без особого стремления воспроизвести в искусственном свойственные живому явления. Причина тому – как незнание с достаточной полнотой того, как все это происходит в живом, так и желание исследователей, их (само) уверенность в способности создать нужное даже лучше природного. Такой функциональный подход в прикладной науке до последнего времени был основным, поскольку он давал полезные практические результаты³. И хотя эти результаты касались всего лишь некоторых частных приложений использования машинных алгоритмов для обработки данных, эти алгоритмы стали связывать и даже часто отождествлять с тем, что получило название искусственный интеллект (ИИ).

Вряд ли требует доказательства утверждение о том, что уникальные способности вычислительных алгоритмов, решающих узкоспециализированные задачи (в частности, связанные с распознаванием образов) в ряде случаев даже более качественно, чем человек, отношения к реальному, естественному интеллекту (ЕИ) имеют весьма отдаленное. Ибо настоящий интеллект любого уровня эволюционной сложности способен понимать, что является следствием наличия в объекте в качестве обязательных составляющих ряда базисных свойств (способности ощущать, воспринимать, запоминать, представлять, воображать, предвидеть, планировать и пр.). При этом ЕИ способен одновременно решать несколько разноплановых задач (когнитивная гибкость), чего узкоспециализированные программы ИИ не могут. Потому и нет до сих пор какого-либо внятного объяснения того, почему нейросеть делает тот или иной вывод. Но есть понимание того, что нейросеть легко обмануть, она способна совершать грубые ошибки, которые никогда не сделал бы человек⁴. Несмотря на свою «глубинность», нейросеть, осуществляя концептуально поверхностный анализ исходных данных, их локальное обобщение ничего не понимает. Это исключает широкое применение таких сетей на потенциально-опас-

² Заметим, что сами по себе попытки реализовать функции живого в технике, не совсем представляя, как они реализуются в природе, во многих случаях позволяют лучше понять то, как они действительно реализуются в живом организме.

³ Заметим, что сами по себе попытки реализовать функции живого в технике, не совсем представляя, как они реализуются в природе, во многих случаях позволяют лучше понять то, как они действительно реализуются в живом организме.

⁴ См., например: «Атака на модели машинного обучения сбивает робоавтомобили» (http://ai-news.ru/2017/08/ataka_na_modeli_mashinnogo_obucheniya_sbivaet_robavtomobili.html), где простые манипуляции с дорожными знаками заставляют систему машинного зрения делать грубые ошибки. С учетом отсутствия понимания, почему нейросеть приходит к тому или иному выводу, ошибочность заставляет специалистов все реже пользоваться услугами нейросетевых систем поддержки принятия решений (пример – медицинская диагностическая система Watson IBM)

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

ных объектах, в военной сфере, при принятии ответственных решений. Кроме того, как известно, нейросети не могут приобрести новый опыт распознавания объектов другого класса, не потеряв при этом старый опыт, а приемлемое качество распознавания получается лишь после обучения на огромном количестве примеров (в то время как ребенок способен после показа ему всего несколько раз нового для него предмета узнавать его в будущем в разных ситуациях, ракурсах, ...). Вычислительная мощь и наличие большого объема исходных данных - два фактора современного возрождения нейросетей в соответствии с философской идеей «назад в будущее»⁵.

«Настоящим» ИИ может быть только универсальный («общий», неспециализированный) ИИ, реализация которого невозможна без придания искусственному объекту в достаточно полном объеме того, что применительно к живому именуют психикой.

Психика традиционно является объектом исследования, прежде всего, психологии. Но психология, при всем уважении к ее достижениям и все большему устремлению в сторону психофизического, во многом пока остается наукой описательной. Причина - в сложности психики как объекта исследования, невозможности во многих случаях применения в ней традиционного научного приема - измерения - в связи с отсутствием точно воспроизводимой меры, ее носителей. Отсюда - наличие различных психологических концепций, различных объяснений, терминологической неоднозначности. Как следствие - отсутствие целостного понимания и описания механизмов и процессов порождения и реализации психики даже на описательном уровне, не говоря уже об «истинно» научном, оперирующим понятными материальными (и потому измеримыми) объектами и процессами⁶. Но именно такой материальный, научный подход («научная психология», пользуясь выражением А.Н. Леонтьева [1]) сегодня нужен для настоящего понимания психики живого как для профилактики и лечения ее за-

болеваний у человека и животных, так и для искусственного воссоздания ее элементов и проявлений (в частности, ИИ) в технических системах, в роботах.

Сложность понимания порождения и функционирования психического неоспорима. Следуя Леонтьеву А.Н., повторим, что законов его формирования нет в отражаемых им объектах действительности, хотя без них оно принципиально невозможно. Этим законам нет в явном виде и в протекающих в мозгу физиологических процессах. Психика связана с этими процессами, но можно ли в них увидеть сущность психического [1]? Можно лишь утверждать о параллельности протекания физиологических процессов и субъективных переживаний, предполагая наличие связи между ними, но объяснить переход одного в другое мы пока не в силах⁷.

Путь один - объединение знаний психологии с достижениями других, более «естественнонаучных» дисциплин (физиология, биология, физика, химия, математика, ...) и интегральных направлений, что наблюдается сегодня, например, в рамках различных проявлений нейрологии (нейрофизиология, нейропсихология, нейролингвистика и др.)⁸. Такая междисциплинарность - естественный (и, по сути, единственный) путь обобщения научных знаний и достижений, ключ к успеху понимания, профилактики и лечения заболеваний психики, искусственного ее воспроизведения на том или ином уровне в технических конструкциях. Попытки увидеть «за деревьями лес» «интегрированным» зрением весьма полезны⁹. Целесообразность такого подхода к сотворению искусственного («по своему образу и подобию» и по подобию «братьев наших меньших»), предназначенного к тому же функционировать с похожими целями в тех же условиях, что и взятое в качестве прототипа живое, тем более на начальном этапе такого «творчества», чтобы хотя бы понять, как и куда двигаться, вряд ли надо отрицать¹⁰. В течение миллиардов лет эволюции природа успешно апробировала и совершенствовала свою «универ-

⁵ Иначе: «Старые алгоритмы на быстрых компьютерах» [19].

⁶ Пока нет приемлемой для междисциплинарного применения модели КСПС человека с иерархически-сетевым описанием их структуры, эволюционного формирования, индивидуального становления и развития.

⁷ Полагая психические субъективные переживания результатом эмерджентного объединения мозга (с протекающими в нем процессами), тела и окружающей среды, стоит признать, что такой системный переход является наиболее сложным для понимания и реализации «фазовым» переходом («самоорганизации» как сказали бы поклонники такого «объяснения»), наиболее сложным примером порождения «нового» из «старого», «сложного» из условно «простого». Основной механизм такого объединения демонстрирует нейросеть как интеграция обобщенного ряда Фурье («новое» на данном иерархическом уровне есть объединение «старого», базисного со своими весовыми коэффициентами) и нелинейного (какого?), обеспечивающего переход на другой иерархический уровень, преобразования).

⁸ Но вслед за Хейббом и Брунером заметим, что крепкий междисциплинарный мост требует наличия твердых опор на концах.

⁹ Периодическая дифференциация дисциплин с их последующей (по накоплению ими частных знаний, которым становится «тесно» в узких рамках одной дисциплины, и все большим их отдалением друг от друга) интеграцией - естественный цикл развития науки.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

сальную технологию интеллектуализации», которую можно и нужно освоить человеку.

Как человек может использовать ИИ? Во-первых, как индивидуального помощника, способного усилить умственные возможности отдельного человека, делая то, на что не способен человек (быстро считать, обрабатывать большие массивы данных, визуализировать результаты), общение с которым человек может осуществлять по различным интерфейсам. Во-вторых, как заменителя представителей отдельных профессий, связанных с автономным выполнением умственной, но не слишком творческой работы (секретари, переводчики, юристы, бухгалтеры, диспетчеры и др.). В-третьих, как помощника (партнера), способного к реализации целенаправленного поведения в реальной среде вместе с человеком или вместо человека (там, где человек в силу анатомических и физических особенностей не способен совершить требуемые действия или где эти действия сопряжены с опасностью). В-четвертых, как обособленного искусственного объекта с достаточно широкой свободой совершения им автономных действий. Во всех случаях ИИ способен к («само») развитию¹¹. Заметим, что, если в первом направлении речь идет об ИИ как «инструменте», то в четвертом – уже об ИИ как «организме» со всеми вытекающими последствиями его эволюционного (в том числе – ускоренного) развития.

Какие качества и особенности психики живого (человека) следует принимать во внимание, пытаться ее воссоздать на том или ином уровне эволюционного развития в программах, роботах? Укажем и поясним некоторые из них в качестве аксиом «настоящего» ИИ, учитывая ограничения на объем статьи и ориентируясь на соответствие существования, функционирования и развития любых природных объектов идее минимизации требуемых для этого расходов основных природных

ресурсов: пространства, энергии, времени (принцип минимальности [3, 4, 11, 12]), на универсальность естественной природной технологии интеллектуализации [2, 5-10], на идеи классической психологии [1, 13-18], мнения ученых и специалистов [19-25].

1. *Интеллект* – интегральное проявление целостной психики, ее интегральное сверхаддитивное свойство, метапрограмма, обеспечивающая выживание и развитие ее носителя, свойство способного к автономному поведению в реальной или виртуальной средах объекта на основе генетического и постоянно пополняемого в процессе жизни индивидуального опыта достоверно предвидеть будущее, планировать и реализовывать целенаправленное поведение с созданием новых успешных стратегий и алгоритмов, программ.

2. *Психика* любого организма как система управления его развитием и поведением (во внешней среде) реализуется посредством множества генетически заданных и последовательно раскрываемых неизменных, а также индивидуально настраиваемых программ¹². Проявляется как специфическая (для каждого эволюционного уровня живого) совокупность протекающих в организме процессов (для человека: ощущения разных модальностей, внимание, восприятие, осознание, запоминание, вспоминание, представление, воображение, предвидение, планирование, речь, движение), позволяющих их реализовать состояний (сосредоточенность, напряженность, стресс, ...) и свойств (темперамент, характер, целеустремленность, жизненная позиция (потребности, интересы, убеждения, идеалы), способность к эмпатии, сопереживанию). Многие состояния порождаются эмоциями и (или) являются ими¹³, неся коммуникативную функцию. Перечень базисных ПОСП психики определяется местом (?) организмов данного вида в природной системе, их «целевой функцией».

¹⁰ На первый взгляд, ключевой «недостаток природной эволюции применительно к живому» – невозможность разобрать живой организм на составные части с последующей сборкой на «новейшей элементной базе» с выбрасыванием «устаревших» частей и деталей. Природа не может прервать существование вида и надстраивает новое над старым, обеспечивая, при необходимости, «отмирание того», что долго не используется. Отсюда и рассуждения о «локальных эволюционных ловушках», о том, что «природа не стремится к лучшему», обеспечивая существование всем, кто способен выжить в достаточно широких условиях среды, о «клубках» (Г. Маркус), о наличии несовершенных эволюционных механизмов (аккомодация глаза и др.). Как следствие, вывод о возможности создания искусственного иначе, чем по «образу и подобию», причем более совершенного. Этот вывод справедлив, но лишь частично. Дело в том, что наличие в природе у более сложных организмов важной части того, что есть у низших, можно рассматривать не как недостаток эволюции, но как необходимое условие выживания этого сложного организма в мире, где есть и медлительное сложное (усложнение, как правило, улучшает спектр возможностей, но ухудшает оперативность поведения), и быстродействующее простое. Потому у человека в мозгу есть все – от «древнего мозга рептилий» до шестислойной коры и он способен реагировать посредством задействования разных механизмов в зависимости от обстановки, понимать поведение и намерения других. Так что созданное иначе, чем «по образу и подобию», может быть лучше, но лишь для выполнения отдельных весьма частных функций в специфических условиях применения. Что и демонстрируют нейросети глубокого обучения.

¹¹ «Саморазвитие» – обязательный признак интеллекта.

¹² Применительно к живому текст этих программ описывается, по-видимому, геномом, исполняемый же (после «компиляции» в ...?) код науке (пока) неизвестен.¹⁰ «Саморазвитие» – обязательный признак интеллекта.

¹³ Интерес-возбуждение, радость, удивление, горе-страдание, депрессия, гнев, отвращение, презрение, страх, стыд-застенчивость, вина.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

3. **Распознавание** (на разных уровнях восприятия, обобщения) – ключевая психическая операция. Обращена к опыту (генетическому и (или) индивидуальному), позволяет совершать адекватные ситуации действия; предвидя будущее, планировать поведение, контролировать и корректировать его для достижения цели (как при наличии, так и при отсутствии сознания и связанных с ним состояний и процессов). Базируется на памяти (генетической и индивидуальной), реализуется с обнаружения признаков класса (категории) с последующим их уточнением, идентификацией, запуском целесообразных реакций. В живом реализуется посредством интеграции ощущений через восприятие при задействовании памяти, коры ГМ. Постепенная обработка сенсорных ощущений по мере движения к коре все больше испытывает влияние информации от нее.

4. **Сознание** – системное, эмерджентное свойство, появляющееся при достижении организмом определенной сложности¹⁴, обеспечивающее активную роль организма в процессе жизнедеятельности, определяющее наличие самосознания, свободы воли, переживаний (эмоций и чувств), рефлексии, интроспекции, эмпатии, речи. Специальный механизм обеспечения успешания в сложном мире за счет предвидения и способности «сделать заранее». В биологическом смысле – инструмент интеллекта, позволяющий организму осуществлять целесообразное поведение в новых условиях (или в старых условиях, но с новыми целями) с формированием новых рефлексов и автоматизмов поведения, пополняющих индивидуальный опыт (т.н. «подсознание», куда сознанию обычно нет доступа). Многие когнитивные процессы в обладающем сознанием организме идут на бессознательном уровне (в том числе – обязательное для восприятия категорирование).

5. **Проявления психики** (как в построении, так и в функционировании) отражают пространственно-временной характер существования материи:

- *топологичность* восприятия пространства и предметов в нем, обеспечивающая его инвариантность к преобразованиям (эта идея – ключ к устранению недостатков современных систем распознавания);

- *ассоциативность* памяти как способ связы-

вания близко расположенных в пространстве и времени объектов восприятия. Реализуется естественным образом – посредством частичного «перекрытия» групп нейронов мозга, «хранящих» различные, но близкие (во времени и (или) пространстве) образы, так что активация одного образа вызывает активацию связанного с ним другого образа как следствие того, что эти группы имеют общие нейроны. Позволяет формировать целостные образы объектов, даже получая сенсорную информацию только по одному из каналов (например, только по зрительному или только по слуховому), поскольку информация этого частного канала по мере продвижения в нервной системе к «центру распознавания» ассоциативно связывается с информацией других каналов восприятия, так что в итоге «центром» воспроизводится не только отдельное ощущение, но и представляется связанный с этим ощущением целостный обобщенный (видовой), а при распознавании «автора» – конкретный образ¹⁵.

6. **Робот** – искусственный объект, реализующий в реальной или виртуальной среде целенаправленное рациональное поведение без непосредственного контакта с человеком¹⁶[2].

7. **Психика роботов (Р-психика)** – как отображение психики живого:

- наличие «генетических» жестких (сенсор – эффектор: быстроедействие) и гибких (сенсор-СУ-эффектор: пробуждаются и настраиваются в процессе индивидуального поведения в реальной среде) программ;

- обучение в реальной и виртуальной сферах (подражание, самообучение, групповое поведение совместно с другими Р и РТК, человеком);

- направляемый (в том числе – ускоренно) фило- и онтогенез;

- соответствие уровня развития психики уровню развития тела, своему предназначению;

- базисность, модульность, унификация, стандартизация, иерархически-сетевая структура;

- интеллект и сознание как иерархически связанные «менеджеры» эволюционирующей психики.

8. **Проблема дружественности саморазвивающейся в процессе деятельности психики**, проблема «загрузки ценностей» решается не только генетикой¹⁷ (хотя это главное), но и воспитанием.

¹⁴ Продолжающее после появления далее эволюционировать, так что можно говорить о разных уровнях развития сознания у живого. Целесообразно разделить психику по уровню развития на два больших класса: на имеющую в качестве своего свойства сознание и не имеющую (очевидно, что внутри этих классов могут быть введены различные подклассы в зависимости от уровня развития соответствующего вида психики).

¹⁵ Так, услышанный звук «мяу» может сформировать у нас как абстрактный образ кошки, так и конкретный (в случае распознавания обладателя именно этого «мяу»).

¹⁶ Такое определение свободно от антропоморфизма, позволяя, к тому же, отнести к роботам не только автономно-действующие, но и дистанционно-управляемые программы и устройства.

¹⁷ В частности, задание моральных принципов (есть, и не без основания, мнение о том, что моральные принципы поведения людей имеют генетическую основу [25]), поведенческих «табу», «потолка» развития.

И это действительно проблема¹⁸. Нужно образование, причем, как и для людей, в виде единства воспитания и обучения. Нужна ли роботам мораль, ценности? – Да, ибо они определяют поведение, а не логика¹⁹. Нужны ли эмоции? – Да, и не только для коммуникации, но и для самоорганизации²⁰. Не говоря уже о языке. Способны ли роботы на чувства?

Литература

1. Леонтьев А.Н. Эволюция психики. М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 1999. 416с.
2. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Интеллектуализация военной робототехники: терминологическая и технологическая проблемы // Известия Института инженерной физики, 2017. № 3(45). С.87-93.
3. Бугаков И.А. Система принципов построения сложных технических систем и их элементов, подвергнутых экстремальным воздействиям в процессе функционирования, на основе антропологического подхода // Датчики и Системы, 2000. №10. С. 67-71.
4. Бугаков И.А. Информация: появление, существование, восприятие // Датчики и Системы, 2001. № 2. С. 41-47 (ч.1); 2001. № 3. С. 61-68 (ч.2).
5. Бугаков И.А. Бугаков А.И., Котов А.А., Умников Е.В., Царьков А.Н. Принцип минимальности и интеллектуализация робототехники: на пути к универсальной технологии // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. Т.2. С.133-146.
6. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи // Известия Института инженерной физики, 2015. № 2(36). С.65-72.
7. Бугаков И.А. О необходимости разработки методологии, теории и универсальной технологии интеллектуализации робототехники военного и специального назначения // Труды военно-научной конференции «Роботизация ВС РФ». М., 2016. С. 87-89.
8. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Универсальная технология интеллектуализации робототехники: основания интеллектуального поведения // Материалы XI Всеросс. НПК «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону. Т.2. 2016. С. 303-316.
9. Бугаков И.А. Базисный подход как универсальный механизм реализации поведения интеллектуальных антропоморфных роботов // Сб. трудов участников VI Всеросс. НПК «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакци-

ей проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. С. 135-138.

10. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Искусственный интеллект в военной робототехнике: возможности, риски, пути реализации // Перспективные системы и задачи управления: материалы XII Всеросс. НПК / Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2017. С. 250-260.

11. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвящ. 150-летию издания «Рефлексов головного мозга» И.М. Сеченова. М.: ИИнтелЛ, 2014. С. 291-316.

12. Бугаков И.А. Сознание, интеллект, нейрофилософия и принцип минимальности // Актуальные вопросы нейрофилософии – 2015. Ежегодник. Материалы межд. междисц. семинара «Нейрофилософия». Ред. Алексеев А.Ю., Дубровский Д.И., Кузнецов В.Г. М.: ИИнтелЛ, 2016. С. 106-130.

13. Выготский Л.С. Психология развития человека. М.: Изд-во Смысл; Изд-во Эксмо, 2005. 1136 с.

14. Лурия А. Р. Лекции по общей психологии. СПб.: Питер, 2006. 320 с.

15. Столяренко Л.Д. Основы психологии. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 671 с.

16. Немов Р.С. Психология. М.: ВЛАДОС, 2003. 688 с.

17. Сосновский Б.А. Психология. М.: Юрайт, 2010. 660 с.

18. Брунер Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. Пер с англ. М.: Прогресс, 1977. 413 с.

19. Что мы думаем о машинах, которые думают: Ведущие мировые ученые об искусственном интеллекте / Джон Брокман; Пер. с англ. М.: Альпина нон-фикшн, 2017. С.74-377.

20. Прибрам К. Языки мозга. Экспериментальные парадоксы и принципы нейропсихологии. // Перевод с английского Я. Н. Даниловой и Е. Д. Хомской. М.: Прогресс, 1975.

21. Найссер У. Познание и реальность. Смысл и принципы когнитивной психологии. М.: Прогресс, 1981. 232 с.

22. Величковский Б.М. Компьютеры, мозг, познание: успехи когнитивных наук. М.: Наука, 2008. 293 с.

23. Смит К.Ю.М. Биология сенсорных систем. // Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 583 с.

24. Саймон Г.. Науки об искусственном: Пер. с англ. Изд. 2-е. М.: Едиториал УРСС, 2005. 144 с.

25. Хаузер М. Мораль и разум: Как природа создала наше универсальное чувство добра и зла. М.: Дрофа, 2008. 639 с.

¹⁷ В частности, задание моральных принципов (есть, и не без основания, мнение о том, что моральные принципы поведения людей имеют генетическую основу [25]), поведенческих «табу», «потолка» развития.

¹⁸ Ибо «даже хорошие люди не знают, как создать хороший ИИ». Добавим, что нужен такой «хороший» ИИ, который «плохие» люди не смогли бы превратить в «плохой».

¹⁹ Поскольку субъективная функция полезности, как показал Д. Юм, содержит нечто большее, чем используемая субъектом модель мира, то составив программу для робота, мы можем получить то, что запрограммировали, но не то, что хотели [19].

²⁰ Почти во всех психических проявлениях при внимательном рассмотрении можно найти явную биологическую, соответствующую принципу минимальности и направленную на выживание целесообразность.

СОБЫТИЯ

ОБСУДИЛИ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ

В середине апреля в Серпухове состоялась VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Современное непрерывное образование и инновационное развитие».

В конференции приняли участие 500 человек из Москвы, Серпухова, Серпуховского района, Тулы, Зарайска, Уфы, Нижнего Новгорода, Наро-Фоминска, Домодедово, Протвино, Пушкино, Подольска, Щербинки, Энгельса, Чеховского и Ленинского районов, а также из Узбекистана и Беларуси. Это руководители, педагоги, воспитатели дошкольного, среднего, среднего специального и высшего образования, руководители предприятий, региональных и государственных органов управления образованием.

Открыл конференцию Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ», заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор, Почетный гражданин города Серпухова А.Н. Царьков.

Новой традицией конференции, которую активно поддержала общественность и педагогическое сообщество, стало чествование педагогов, которые всю жизнь посвятили воспитанию и образованию подрастающего поколения, имеющие стаж педагогической деятельности более 40, а некоторые и более 50 лет.

С докладами на пленарном заседании выступили: ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Институт стратегии развития образования РАО», д.п.н. Л.Н. Алексашкина, руководитель Центра Информатизации образования ФГБНУ «Институт управления образованием РАО», академик РАО, д.п.н., профессор И.В. Роберт, главный научный сотрудник ФГБНУ «Госметодцентр», заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д.т.н., профессор Н.М.Емелин, член Общественной Палаты Союзного государства «Россия – Белоруссия», советник министерства образования Республики Азербайджан, отличник здравоохранения РФ, почетный работник образования РФ, д.м.н., профессор В.Ф. Базарный и многие другие известные педагоги.

Работа девяти секций конференции была по-



священа теории и методологии непрерывного образования, методам и моделям повышения и оценки качества образования, здоровьесберегающим, здоровьеразвивающим, психолого-педагогическим технологиям в образовании, прикладным научным исследованиям и разработкам, социальным и правовым аспектам непрерывного образования, проблемам и направлениям развития непрерывного образования.

В рамках конференции состоялся круглый стол «Цифровое образовательное пространство. Цифровая школа», на котором обсуждались вопросы структуры и порядка формирования цифровой школы как элемента цифрового образовательного пространства, направления цифрового обучения, опыт реализации и критерии эффективности.

По итогам работы будет выпущен сборник трудов участников конференции, для публикации в котором подано 420 статей.

КНИГА К ЮБИЛЕЮ

В канун юбилея МОУ «ИИФ» вышла книга «Институт инженерной физики: 25 лет успешной работы». В ней повествуется о создании, становлении, развитии и сегодняшнем дне Института. Рассказ об организации в целом и конкретных людях, научных достижениях и инновационных идеях, новейших технических разработках и передовых образовательных технологиях делают книгу интересной не только для ветеранов и сотрудников МОУ «ИИФ», но и для всех, кто интересуется историей и сегодняшним днем российской науки и техники.





AUTHORS

Ananiev Evgeny M. Honored worker of science and technology of Russia, corresponding member of AIO. Candidate of Technical Sciences, associate professor. First Vice-President of the Institute – the First Deputy General Director. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Andreyev Anatoly N. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Andruh Oleg N. Honored worker of science and technology of the Russian Federation. Candidate of technical Sciences, associate Professor. General Director JSC "Scientific and production Association" National technologies, industrial design and engineering», Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Arkipov Vladimir Yu. Senior researcher. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Atakishchev Oleg I. Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Avdeeva Mariya M. The engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bezrodny Boris F. Doctor of Technical Sciences, professor. Head of the Department of Applied Mathematics. Moscow State Automobile and Roads Technical University. Moscow, Leningradsky Prospekt, 64.

Bezrodny Igor F. Candidate of Technical Sciences, associate professor. Scientific consultant JSC «Scientific-Production Enterprise «GERDA». Moscow, V.Latsisa st., 17, building 1.

Bikmayev Ramil R. Programmer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bugakov Igor A. Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bukin Artem C. Candidate of Technical Sciences, associate professor. Lead scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bystrov Denis E. Assistant department head – the chief of group 5 of department "Management of perspective and trans-species researches and special projects" Ministry of Defence of Russian Federation. Moscow, Moskvoretskaya Embankment, 9a.

Cariow Aleksandr P. Doctor of Technical Sciences, professor. Full professor, Department of Computer Architectures and Teleinformatics, Faculty of Computer Science and Information Technology, West Pomeranian University of Technology, Szczecin.

Gordeev Gennadiy A. Head of Division. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Grachev Vladimir A. Honorary Worker of Higher Professional Education. Candidate of Pedagogical Sciences. Advisor to the President of the Institute. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Diagilev Vladimir I. Candidate of engineering sciences, assistant professor of the department ATPiP of Protvino branch Dubna State University. Moscow reg., Protvino, Northern Passage, 9.

Evgrafiev Pavel P. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Elistratov Alexander V. Leading engineer. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Ermakov Andrei D. Cadet. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Kokovin Valery A. Candidate of engineering sciences, manager by the laboratory of Protvino branch Dubna State University. Moscow reg., Protvino, Northern Passage, 9.

Kolombet Eugeny V. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kolombet Valeriy A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Korovin Oleg V. Candidate of Technical Sciences, associate professor. The head of Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Korchevaya Irina O. Magistracy student. Moscow Aviation Institute (National Research University). Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Kouznetsov Ilya E. Head of sector NTC "Terahertz" CJSC "RTI-Radio". Moscow, 8th Marta, 10, building 1.

Kukin Nikolay S. Candidate of Technical Sciences. Senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Kulik Maksim V. Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Kvasov Mikhail N. The postgraduate student of the Department of Networks and Communication Systems of Space Complexes Mozhaiskiy Military Space Academy. Saint Petersburg, Zhdanovskaya nab., 13.



AUTHORS

Lesnykh Vadim N. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Lobov Igor V. Candidate of physical and mathematical sciences, senior staff scientist of Protvino branch Dubna State University. Moscow reg., Protvino, Northern Passage, 9.

Lychagov Alexander S. Candidate of Technical Sciences. Lecturer in «Astronomical and geodetic support, navigation and aiming of the RK». Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Martynova Inna A. Graduate student of MIPT (SU). Junior researcher. All-Russian Scientific Research Institute of Automation. Moscow, ul. Bolshaya Ordynka, 24.

Morgunov Dmitriy A. Graduate student. Lead software engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a

Muradova Anna R. Magistracy student. Moscow Aviation Institute (National Research University). Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Nizhegorodov Anatoliy A. Candidate of Technical Sciences. Professor. Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Pavlov Andrey V. Scientific associate. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Podvigin Sergey V. Candidate of Technical Sciences. Senior lecturer. Senior scientific employee. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Ponomareva Alina S. Candidate of physical and mathematical Sciences, senior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Popov Vasilii V. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Prisyajnyuk Andrey S. Candidate of Technical Sciences. Executive director. CJSC "Institute of Telecommunications". Saint Petersburg, ul. Kantemirovskaya, 5.

Prisyajnyuk Sergey P. Doctor of Technical Sciences, professor. General director. CJSC "Institute of Telecommunications". Saint Petersburg, ul. Kantemirovskaya, 5.

Pushkareva Elena Yu. Doctor of Technical Sciences, professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Red'kin Victor V. Honored worker of science and technology of Russia. Candidate of Technical Sciences. Senior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Schabalin Oleg V. Candidate of Technical Sciences. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Semionov Pavel A. Candidate of physical and mathematical sciences, professor. National Research Nuclear University, MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

Seraya Olga Yu. Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Sitnikov Vladimir P. Design engineer JSC "Scientific and production Association" National technologies, industrial design and engineering», Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smirnov Nikolay V. Scientific associate. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Sukhovetsky Boris I. Candidate of Technical Sciences. Advisor to the General Director, CJSC "Institute of Telecommunications". Saint Petersburg, ul. Kantemirovskaya, 5.

Sytin Aleksandr N. Doctor of physical and mathematical sciences, professor of the department ATPiP of Protvino branch Dubna State University. Moscow reg., Protvino, Northern Passage, 9.

Umnikov Evgeny V. Leading engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Tsvetkov Kirill Yu. Doctor of Technical Sciences, professor. Head of the Department of Networks and Communication Systems of Space Complexes Mozhaiskiy Military Space Academy. Saint Petersburg, Zhdanovskaya nab., 13.

Tzar'kov Alexey N. Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Vaguin Alexei I. Candidate of Technical Sciences. Director NTC "Terahertz" CJSC "RTI-Radio". Moscow, 8th Marta, 10, building 1.

Vasiliev Alexander N. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. National Research Nuclear University, MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

Vinogradov Alexey S. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Volkov Gennadiy G. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. The Petersburg Nuclear Physics Institute. Leningrad Oblast, Gatchina, Orlova roshcha, 1.

Zolotukhin Vasily A. Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.



ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

Решение о публикации.

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предо-

ставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

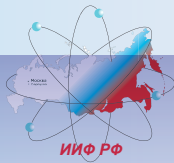
Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать



Межрегиональное общественное учреждение
“Институт инженерной физики”
 (научное, образовательное и производственное учреждение)

В НОМЕРЕ

публикации, которые имели значение при создании завершенной работы.

Авторство материала.

ПРИБОРСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

7 Гордеев Г.А., Попов В.В., Пonomarev A.C., Павлов А.В., Смирнов Н.В.

Расчет теплового режима элементов блока радиоэлектронной аппаратуры, который только действует при пуске и в котором не включены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также те, кто все события в знакомился и одобрил окончательную версию проекта модернизации системы пожарной безопасности.

12 Безродный Б.Ф., Безродный И.Ф., Виноградов А.С.

Планирование процесса модернизации системы пожарной безопасности в том технических и экономических рисков.

16 Пушкарёва Е.Ю.

Раскрытие информации и конфликт интересов.
 Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется компенсация случайных возмущений в канале стабилизации угла тангажа в баллистическом ракете на основе метода двухконтурных систем, эквивалентных их рукописи.

21 Нижегородов А.А., Евграфьев П.П.

Методика построения структуры самокалибруемого акселерометрического модуля космического аппарата для выполнения полета

25 Авдеева М.М., Ананьев Е.М., Коровин О.В., Подвигин С.В.

К АВТОРАМ СТАТЕЙ
 Метод оптической диагностики для исследования оптоэлектрических параметров термоэлектроволокна для защиты высоковольтных проводов воздушных линий электропередачи от обледенения

31 Редькин В.В., Шабалин О.В., Кулик М.В., Ермаков А.Д.

Выбор принципиальной структурной схемы и основного оборудования бортового генератора холодного азота авторегулируемого

35 Присяжнюк С.П., Присяжнюк А.С., Суковенный Б.И.

Найти решение задачи о смешивании волн в волноводной решетке с линейными элементами большей длины волны

42 Цветков Ю.Ю., Квасов М.Н.

Модель термостатной декарбонизации в цепи системы информации, не обмениваясь данными с другими системами обслуживания с «разогревом»

47 Семёнов Т.А., Васильев А.Н., Кукин Н.С., Корчевая И.О., Мурадова А.Р.

Определение ориентаций осей NV-центров относительно поверхности монокристалла

50 Моргунов Д.А., Букин А.Г.

Математическая модель многопоточной программы ЭВМ, построенная на основе переходов между функциями исходного кода

56 Коломбет В.А., Архипов В.Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю.

Ученое звание, должность и место работы, Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов

63 Волков Г.Г., Кукин Н.С., Мурадова А.Р., Корчевая И.О., Мартынова И.А.

После литературы помещаются: Программа-аппаратный комплекс для лабораторных научных исследований

72 Вагин А.И., Лобов И.В., Ситин А.Н., Коковин В.А., Кузнецов И.Е., Дягилев В.И.

Эффективность интеллектуальных систем управления в ненижестационарному моделированию робототехнических комплексов

76 Умников Е.В., Гранёв В.А., Атакишев О.И.

Методика оценки эффективности интеллектуальных систем управления в ненижестационарному моделированию робототехнических комплексов

83 Быстров Д.Е., Дынагов А.С., Бинмаев В.Р., Андреев А.Н.

Методика оценки порождения и ориентации систем технического зрения

86 Царёв А.П.

Методика оценки порождения и ориентации систем технического зрения

95 Ананьев Е.М., Андрух О.Н., Ситников В.П.

Обоснование требований к автономному источнику питания мобильных систем электрообогрева объектов

100 Бугаков И.А., Царьков А.Н.

О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и психике роботов

106 СОБЫТИЯ

107 АВТОРЫ

109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность — незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

ИЗВЕСТИЯ
НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, в том числе, которые могут иметь место при рассмотрении статей.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Если материал опубликован в форме, доступной для индексирования.

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
 заслуженный деятель науки РФ,
 доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИ МО РФ»
 заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
 изобретатель РФ, лауреат Государственной
 премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
 доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянкин

заслуженный деятель науки и техники, РФ, СР,
 аспирант кафедры департамента Государственной
 корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
 доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА
 «Известия Инженерной физики»

Павел Валерьевич Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
 лауреат Государственной премии СССР,
 доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заслуженный деятель науки и техники, РФ, СР,
 доктор технических наук, профессор

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
 Института физики им. П.Трапезникова (г. Серпухов)

Александр Викторович Синьковский

старший научный сотрудник
 Европейского центра ядерных исследований (CERN),
 Adjunct Assistant Professor
 Института физики им. П.Трапезникова (г. Серпухов)

Анатолий Васильевич Тодосийчук

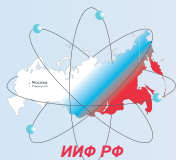
главный советник аппарата Комитета по защите интеллектуальной собственности РФ по защите интеллектуальной собственности
 доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой информационных технологий и защиты информации Западно-Сибирского государственного университета (Тюмень),
 доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шерemet

заместитель директора Российского фонда
 фундаментальных исследований по науке,
 член-корреспондент РАН,
 доктор технических наук, профессор



CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Gordeev G.A., Popov V.V., Ponomareva A.S., Pavlov A.V., Smirnov N.V.

Calculation of the thermal conditions of the elements of the radioelectronic equipment block at the design stage 7

Bezrodny B.F., Bezrodny I.F., Vinogradov A.S.

Planning of the innovation process modernization of fire safety systems taking into account the technical and economic risks 12

Pushkareva E.Yu., Zolotukhin V.A.

Compensation of random disturbances in the channel stabilize the pitch angle of a ballistic missile based on the method of dual circuit systems equivalent to the combined 16

Nizhegorodov A.A., Evgrafiev P.P.

Method for constructing the structure of a self-calibrating accelerometer module of a spacecraft in long-range flight conditions 21

Avdeeva M.M., Ananiev E.M., Korovin O.V., Podvigin S.V.

Method of optimization of constructive-component and thermal-electrical parameters of heat electric fiber for the protection of high voltage wires of the air transmission line from icing 25

Red'kin V.V., Schabalin O.V., Kulik M.V., Ermakov A.D.

Choice is the fundamental structural scheme and main equipment of the on-Board generator cold nitrogen refrigerator truck 31

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Prisyajnyuk S.P., Prisyajnyuk A.S., Sukhovetsky B.I.

Antenna grilles with linear dimensions of the elements are larger wavelength 35

Tsvetkov K.Yu., Kvasov M.N.

Operating model re-configuration of a network node of an information exchange system based on non-Markov queuing systems with «starter» 42

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Semionov P.A., Vasiliev A.N., Kukin N.S., Korchevaya I.O., Muradova A.R.

Definition of the NV-centers orientation relatively to the crystal plane 47

Morgunov D.A., Bukin A.C.

Mathematical model of a multithreaded program of computers built on the basis of transitions between the functions of the source code 50

Kolombet V.A., Arkhipov V.Yu., Elistratov A.V., Lesnykh V.N., Kolombet E.V., Seraya O.Yu.

Stochastics and mutations in the universal period-tripling system 56

Volkov G.G., Kukin N.S., Muradova A.R., Korchevaya I.O., Martynova I.A.

SU(2) – qubit-qutrit management of NV-centers in diamond 63

Vaguin A.I., Lobov I.V., Sytin A.N., Kokovin V.A., Kouznetsov I.E., Diagilev V.I.

Software and hardware complex for laboratory scientific research 72

Umnikov E.V., Grachev V.A., Atakishchev O.I.

Methods of performance evaluation of intelligent control systems in application to simulation of robotic systems 76

Bystrov D.E., Lychagov A.S., Bikmayev R.R., Andreyev A.N.

Technique for assessing the position and orientation of the technical vision system on the locomotive 83

Cariow A.P.

Fast algorithms: science, art, craft 86

INNOVATIVE PROJECTS

Ananiev E.M., Andruh O.N., Sitnikov V.P.

Substantiation of requirements for autonomous power supplies of mobile systems for electric heating of objects 95

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Bugakov I.A., Tzar'kov A.N.

About cognitive modeling, artificial intelligence and psyche of robots 100

EVENTS 106

AUTHORS 107

THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS 109

REQUIREMENTS TO AUTHORS 110



**Межрегиональное
общественное
учреждение**

**«Институт
инженерной
физики»**

(МОУ «ИИФ»)

**научное, образовательное
и производственное
учреждение**

142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный переулок, д. 1а
<http://www.iifrf.ru> e-mail: info@iifmail.ru
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71 факс: +7(4967) 35-44-20 моб.: +7 (917) 581-48-74