

Вестник Московского  
государственного  
университета леса

# Лесной вестник

ISSN 1727-3749

2009 № 6 (69)

90 лет  
МЛТИ-МГУЛ  
1919-2009



- *Международная научно-техническая конференция, посвященная пятидесятилетию факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса*
- *Определение по космическим снимкам биометрических и продукционных характеристик растительности*
- *Интегрированная система управления движением и навигации летательного микроаппарата*
- *Оптимизация объема испытаний подсистем МФКС при известных функциях распределения входных данных*
- *К вопросу о включении элементов истории математики в качестве органической составной части в математические фундаментальные лекционные курсы*
- *Проблемы защиты информации в автоматизированных системах обработки данных и управления*
- *О смешанной задаче для одного класса квазипараболических уравнений*

## СОДЕРЖАНИЕ

### Факультету электроники и системотехники – 50 лет

	<i>Международная научно-техническая конференция, посвященная пятидесятилетию юбилею факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса</i> .....5
Рыбников К.К., Колесин К.О.	<i>Сергей Павлович Королев и создание факультета электроники и системотехники. Реорганизация математической подготовки инженеров в МЛТИ</i> .....6
Билалов Р.А., Григорьев В.А., Павлов А.Е., Попов А.Ю., Свириденко Ю.Н., Селецкая Э.С.	<i>Пакет программ для демонстрации работоспособности, автоматизации процедур настройки и контроля системы позиционирования</i> .....9
Костылев А.Г.	<i>Оценка эффективности фильтров в задачах обработки изображений в условиях помех</i> .....14
Полещук О.М.	<i>Определение рейтинговых оценок объектов с качественными характеристиками и их использование в задачах принятия решений</i> .....18
Галкин Ю.С., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Потапов В.Н., Семенова В.П., Эсаналиев Ч.Д.	<i>Определение по космическим снимкам биометрических и продукционных характеристик растительности</i> .....20

### Системы управления

Ачильдиев В.М., Воробушкин В.В., Домрачев В.Г., Есаков В.А., Иванов Н.М., Наумов А.Н.	<i>Интегрированная система управления движением и навигации летательного микроаппарата</i> .....25
Бедро Н.А.	<i>Сертификация систем позиционирования на основе микромеханических акселерометров</i> .....34
Воробушкин В.В.	<i>Модальный синтез алгоритмов управления летательного микроаппарата</i> .....39
Песельник М.Г.	<i>Система автоматического управления скоростью транспортного средства</i> .....44
Рязанов С.С.	<i>Системы позиционирования для оптико-электронных систем на основе микроэлектромеханических структур</i> .....47
Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Поздняков В.В., Левкович А.Д.	<i>Системы позиционирования для оптико-электронных систем наблюдения и ориентации</i> .....52

## Системный анализ

Борисов А.А.	<i>Обоснование направлений развития микроэлектроники специального назначения на основе использования синергетического моделирования инновационных процессов в отечественной электронной промышленности</i> .....	58
Борисов А.А.	<i>К вопросу о процессно-логистической модели развития электронной компонентной базы специального назначения нового поколения</i> .....	65
Пушкарский С.В.	<i>Оптимизация объема испытаний подсистем МФКС при известных функциях распределения входных данных</i> .....	75
<b>Элементы вычислительной техники и систем управления</b>		
Батырев Ю.П., Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Царьгородцев Ю.П.	<i>Исследование влияния проводимости объекта на выходную характеристику вихретокового датчика</i> .....	80
Беляев Б.Б.	<i>Оценка уходов бесплатформенной гиросинергической системы и точности привязки ее к инерциальному пространству по измерениям астродатчиков</i> .....	82
Беляев Б.Б.	<i>Определение начального состояния системы двигателей-маховиков при исследовании режима стабилизации космического аппарата</i> .....	85
Бурков В.Д., Крапивин В.Ф., Шалаев В.С., Бородин Л.Ф., Миронов А.С.	<i>Микроволновая технология диагностики лесных и торфяных пожаров</i> .....	87
Бурков В.Д., Капранов Ю.С., Перминов С.В., Харитонов Н.А.	<i>Применение современных оптических волокон для построения волоконно-оптических сетей в перспективных космических аппаратах</i> .....	95
Волынцев А.А., Казаков Б.А., Шустов И.Е.	<i>Повышение точности и диапазона измерения гироскопических измерителей вектора угловой скорости</i> .....	102
Пушкарский С.В.	<i>Экспериментальные исследования воздействия радиации на ВАХ транзисторов МОП</i> .....	106
Чернышов А.В.	<i>Система имитации датчиков рабочего места контроля бортовой телеметрической аппаратуры</i> .....	111
Серебренников П.С.	<i>Об оптических свойствах квантовых точек</i> .....	113
Шульц А.Н., Харченко В.Н.	<i>Исследование запуска жидкометаллических тепловых труб для бортовых энергетических систем</i> .....	117
<b>Математика и математическое моделирование</b>		
Зверев Н.В.	<i>Нелокальные модели элементарных частиц в дискретном пространстве-времени</i> .....	122
Рыбников К.К., Ласковая Т.А.	<i>К вопросу о включении элементов истории математики в качестве органической составной части в математические фундаментальные лекционные курсы</i> .....	125

Марковский А.Д.	<i>Открытия, касающиеся представлений чисел, их значение и перспективы</i> .....	127
Сигалов И.Е., Урошлев Л.А.	<i>О смешанной задаче для одного класса квазипараболических уравнений</i> .....	129
Сусов Р.В.	<i>Применение методов имитационного моделирования для оптимизации бизнес-процесса «привлечение клиента»</i> .....	132
Трегуб А.В.	<i>Построение математической модели работы предприятия в условиях изменяющихся налоговых ставок</i> .....	139
Урошлев Л.А.	<i>Исследование обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывными коэффициентами</i> .....	143
Уткин Г.С., Башарин А.П.	<i>Особенности построения модели нагрузочного тестирования</i> .....	145
Шмаков А.В.	<i>Определение параметров расходящейся цилиндрической волны через полиномы Чебышева</i> .....	148
Малиновский И.А.	<i>Подходы к формированию предложения на рынке ИТ-аутсорсинга на основе оценки сходства бизнес-процессов компаний-потребителей</i> .....	149
<b>Информационные технологии</b>		
Афонин Д.Б.	<i>Современные технологии идентификации абонентов в городских компьютерных сетях</i> .....	155
Волков А.С.	<i>Методы организации и сжатия интерактивного видео в видеопотоке: метод масок и пользовательских данных</i> .....	159
Дмитриев А.Н.	<i>Применение методов искусственного интеллекта при реализации функций управления сетями информационного обмена распределенных объектов в интересах повышения эффективности их функционирования</i> .....	161
Рубинштейн А.И.	<i>О колеблемости функций, определенных на конечном множестве</i> .....	167
Рыбников К.К.	<i>Методы настройки систем элементов нейросетей как подход к решению задач анализа универсальных моделей узлов электронных схем</i> .....	170
Сухорученков Д.В.	<i>Интеграция неоднородных баз данных с меняющимися связями сущностей</i> .....	173
Чернышов А.В.	<i>Формирование протоколов испытаний бортовой телеметрической аппаратуры с применением технологии XML</i> .....	175
Якушев Р.С.	<i>Проблемы защиты информации в автоматизированных системах обработки данных и управления</i> .....	180



**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,  
ПОСВЯЩЕННАЯ ПЯТИДЕСЯТИЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ФАКУЛЬТЕТА  
ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМОТЕХНИКИ МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ЛЕСА**

19 марта 2009 года исполнилось 50 лет с момента создания факультета электроники и системотехники. Факультет ФЭСТ был создан по инициативе С.П. Королева с целью подготовки специалистов по электронике и счетно-решающей технике для предприятий ракетно-космического комплекса региона. Период становления и развития факультета совпал с эпохой бурного развития электроники и вычислительной техники. На протяжении всего этого времени педагоги и сотрудники факультета находились на передовых рубежах науки, техники и технологии. На факультете открывались новые специальности, неустанно перестраивались учебные планы, вводились новые и модернизировались старые учебные курсы. Именно активная научная деятельность факультета позволила обеспечить должный уровень подготовки специалистов для предприятий ракетно-космического комплекса и для всего народного хозяйства страны. Было выпущено более десяти тысяч специалистов. Это доктора и кандидаты наук, ученые, инженеры, педагоги, космонавты, руководители предприятий и учреждений, работающие как в России, так и за рубежом. Со многими из выпускников поддерживаются научные и деловые контакты. Поэтому международная научно-техническая конференция, посвященная пятидесятилетию факультета, стала важным событием в череде мероприятий, посвященных юбилею.

Конференция проходила со 2 по 4 февраля 2009 года в стенах МГУЛ и в Голубом зале Центра управления полетами. Организаторами конференции являлись Российская академия наук, Министерство науки и образования РФ, Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, предприятия ракетно-космического комплекса, ведущие вузы России. В конференции приняли участие представители российских и зарубежных организаций, с которыми сотрудничают ученые факультета. Всего было сделано более пятидесяти пленарных и стендовых докладов. Работы отличались по степени своей завершенности – от первых постановочных работ студентов, до готовых диссертационных и фундаментальных работ, внедренных в производство, наиболее перспективных в подготовке специалистов, основанных на инновационных и высокоперспективных НИР. Что и отражено в настоящем сборнике научных трудов.

**Президент МГУЛ,  
профессор А.Н. Обливин**

## СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЕВ И СОЗДАНИЕ ФАКУЛЬТЕТА ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМОТЕХНИКИ. РЕОРГАНИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ В МЛТИ

К.К. РЫБНИКОВ, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук,*  
К.О. КОЛЕСИН, *студент ФЭСТ МГУЛ, член СНО*

*kkrybnikov@mail.ru*

В середине 50-х годов прошлого века прорыв в области космических технологий, разрабатываемых в Советском Союзе, оказался столь значительным, что появилась потребность в подготовке большого количества специалистов, готовых немедленно включиться в разработку решения прикладных задач, требующих немедленной технической реализации.

5 января 1957 г. Сергей Павлович Королев направил в Президиум Совета министров СССР докладную записку о плане освоения космического пространства. В ней, в частности, содержались предложения о подготовке в вузах кадров для ракетно-космической отрасли. В числе институтов, включенных в список таких высших учебных заведений, был и Московский лесотехнический институт. Причин для этого было немало. Во-первых, в МЛТИ был хорошо организован учебный процесс, прежде всего в части постановки фундаментальных курсов. Во-вторых, для преподавания специальных математических и физических дисциплин можно было легко привлечь специалистов из располагающихся рядом в городе Калининграде (ныне Королев) научно-исследовательских подразделений, занимающихся разработкой и эксплуатацией космической техники (РКК «Энергия», ЦУП, ЦНИИМАШ и др.).

Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР, в котором были отражены все предложения С.П.Королева, вышло уже 30 января 1957 г. В соответствии с этим постановлением приказом министра высшего образования СССР В.П.Елютина на МЛТИ была возложена задача подготовки специалистов по специальностям «Математические и счетно-решающие приборы и устройства», «Автоматика и телемеханика», «Приборы управления и контроля химических производств».

Во исполнение этого приказа 19 марта 1959 г. в МЛТИ был создан факультет электроники и счетно-решающей техники (ФЭСТ). Соответствующий приказ за № 292 по Министерству высшего образования подписал заместитель министра С.В. Румянцев. Появились новые кафедры: автоматики и телемеханики (зав.кафедрой – доцент А.И. Гузенко (до этого он работал в МВТУ)), математики и счетно-решающих приборов и устройств (зав. кафедрой – доцент Н.В. Трубников (также из МВТУ)) и электроприборостроения (зав.кафедрой – профессор Иван Васильевич Уткин (Главный конструктор средств телеизмерений НИИ-88).

Деканом ФЭСТа был назначен заведующий кафедрой физики доцент Н.Ф. Гусев. При факультете было создано методическое совещание (приказ по МЛТИ № 236 от 11 апреля 1959 г.), которое должно было рассмотреть новые учебные программы, в том числе и по математике. Одним из шести членов этого совещания был назначен заведующий кафедрой высшей математики профессор Н.В. Ефимов.

К работе были привлечены новые специалисты, имеющие значительный опыт в решении прикладных задач (К.А. Карачаров, Г.А. Силин и др.).

Ответственным исполнителем научных отчетов кафедры стал Константин Андреевич Карачаров, кандидат физико-математических наук, выпускник математикомеханического факультета Ленинградского государственного университета. Участник войны, получивший ранение в страшных боях на Невской Дубровке, он активно работал над прикладными проблемами механики в одном из ленинградских НИИ. Он стал одним из тех специалистов, которыми было укреплено Конструкторское Бюро С.П.Королева. В те времена такие задачи решались мгновенно и

с должным обеспечением. Как он сам потом рассказывал коллегам, для него этот перевод был неожиданным. В течение нескольких дней он получил направление и так называемые «подъемные» в размере годового должностного оклада (в Ленинградском НИИ он занимал должность начальника отдела баллистических расчетов). По прибытии к новому месту работы он получил квартиру в подмосковном Калининграде.

Появление его на кафедре в качестве преподавателя было полезным прежде всего в связи с тем, что кафедра в его лице приобрела специалиста, хорошо знакомого с практическими математическими моделями. В научном отчете кафедры высшей математики за 1957 г. он поместил свои результаты, связанные с решением задачи об устойчивости движения при наличии постоянно действующих возмущающих сил. Эта задача представляла особый интерес как универсальная модель, так как реальная механическая система в той или иной мере всегда находится под воздействием возмущающих сил, учесть которые аналитически при составлении уравнений движения невозможно. После ухода в МГУ Н.В. Ефимова какое-то время возглавлял кафедру высшей математики К.А. Карачаров.

Вслед за ним появились и профессиональные математики, ставшие ведущими лекторами факультета, Геннадий Александрович Силин, Артавазд Александрович Манасян. Преподавание они сочетали с практической научной деятельностью. Первый успешно решал практические задачи газовой динамики (это направление курировал академик АН УзССР Х.А. Рахматуллин), второй получил значительные результаты при анализе задачи изучения колебаний конуса. Многие математики, привлеченные к преподаванию курсов высшей математики, имели отношение к легендарным исследованиям ракет ФАУ, которые проводились в подмосковном Калининграде. Одним из них был, например, К.А. Карачаров, работавший в этом направлении под руководством Николая Дмитриевича Моисеева.

С практическими исследованиями Г.А. Силина в КБ С.П. Королева связан один довольно интересный эпизод. Однажды груп-

па ученых и инженеров, которую он возглавлял, получила задание дать расчет оптимальной с точки зрения безопасности толщины обшивки первого возвращаемого после полета на Землю космического аппарата. Результаты, приведенные в отчете Г.А. Силина, были таковы: толщина стенок аппарата не должна быть меньше 10 мм. Отчет попал на стол С.П. Королеву. «Что это за странная рекомендация?» – воскликнул он при обсуждении проекта и наложил резолюцию: «Толщина стенок – 10 см» (Как тут не вспомнить известную королевскую резолюцию: «Луна твердая»).

Полет оказался успешным, аппарат вернулся на Землю. Спустя несколько дней совершенно случайно Г.А. Силин столкнулся в коридоре с С.П. Королевым. «А ну-ка, пойдемте со мной», – сказал он Силину. Они прошли в специальную, хорошо охраняемую комнату, где стоял космический аппарат. Сдернув с него чехол, Королев показал ему повреждение обшивки. «Повреждения-то оказались не глубже 9 мм», – сказал Генеральный конструктор.

После окончательного ухода в МГУ Н.В. Ефимова, где он впоследствии возглавил сначала кафедру математического анализа, а затем механико-математический факультет, на должность заведующего кафедрой высшей математики МЛТИ был приглашен в 1963 г. Александр Васильевич Ефимов.

За время работы в МЛТИ А.В. Ефимов получил глубокие результаты в теории мультипликативных систем и их применения в теории передачи информации.

В архиве Московского государственного университета леса хранилось (до пожара 2006 г.) личное дело Александра Васильевича, материалы которого говорили об интересной судьбе человека, прошедшего путь от рабочего и солдата до Заслуженного деятеля науки РСФСР, профессора.

Родился он в 1924 г. в селе Наумово Батурлинского района Горьковской области. В начале войны он работал на Горьковском автомобильном заводе слесарем, а затем в 1942 г. был направлен на фронт. После тяжелого ранения с 1944 г. по 1946 г. вновь работа слесарем на одном из горьковских заводов.

В 1946 г. он поступил в Горьковский государственный университет, который окончил в 1951 г. По распределению был направлен на работу учителем математики в одну из сельских школ в Северном Казахстане. В 1952 г. он получил приглашение на преподавательскую работу в Горьковский политехнический институт. Прежде чем приступить к выполнению обязанностей ассистента, какое-то время пришлось быть лаборантом. В 1954 г. А.В. Ефимов поступил в аспирантуру Математического института АН СССР им. Стеклова в Москве. Защитив кандидатскую диссертацию в 1957 г., работает сначала старшим преподавателем Горного института в г. Кемерово, а затем с 1958 г. – старшим преподавателем Военно-воздушной академии в Монино.

Находясь на посту декана факультета, А.В. Ефимов предпринял ряд шагов по модернизации программ преподавания математических курсов. Для многих специальностей были введены учебные программы, предусматривающие изучение таких дисциплин, как математическая логика, теория алгоритмов, теория графов. Надо сказать, что сделано это было весьма своевременно. Без подобной модернизации курсов вряд ли удалось бы

решить проблему преподавания элементов алгоритмизации процессов проектирования и технического моделирования, а именно это и требовалось в первую очередь для будущих специалистов космической отрасли.

Значительное внимание было уделено реализации плана комплексного внедрения ЭВМ в учебный процесс.

Идеи разработки математических курсов, обеспечивающих развитие у студентов логики математического мышления и выработки навыков самостоятельного изучения прикладных разделов математики и построения моделей, нашли отражение в дальнейшей педагогической деятельности А.В.Ефимова уже в Московском институте электронной техники [1].

#### Библиографический список

1. Ефимов, А.В. Математическое образование инженера в условиях научно-технической революции / А.В. Ефимов, А.А. Сазонов // Сб. научно-метод. статей по математике. – М.: Высшая школа, 1981. – Вып. 9. – С. 12–20.
2. Рыбников, К.К. Математики Московского государственного университета леса: учебное пособие / К.К. Рыбников. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 132 с.
3. Научно-технические отчеты МЛТИ за 1952–1959 годы – МОГА, фонд 7188.

## ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР НАСТРОЙКИ И КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Р.А. БИЛАЛОВ, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»,  
 В.А. ГРИГОРЬЕВ, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»,  
 А.Е. ПАВЛОВ, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»,  
 А.Ю. ПОПОВ, ведущий специалист ОАО «НПО Геофизика-НВ»,  
 Ю.Н. СВИРИДЕНКО, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»,  
 Э.С. СЕЛЕЦКАЯ, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»

glmnems@geo-nv.ru

Унифицированная система позиционирования (УФСП) предназначена для определения положения объекта относительно горизонта или углового перемещения объекта относительно заданного положения. Для проверки работоспособности и настройки УФСП применяется ряд трудоемких процедур, требующих больших временных затрат. Разработанный пакет программ позволяет автоматизировать большинство указанных процедур.

УФСП обладает следующими возможностями:

- Определение углового положения прибора относительно горизонтальной плоскости с точностью не менее  $0,1^\circ$ .

- Определение действующего ускорения вдоль осей чувствительности прибора с точностью не менее  $0,005g$ .

- Определение температуры окружающей среды и напряжения питания.

- Дискретность выдачи информации 40 мс.

- Передача информации по протоколу RS-232 со скоростью 115200 б/с.

Основные функции прибора реализованы с помощью двухосного микромеханического акселерометра, аналоговые сигналы которого через операционный усилитель передаются на микроконтроллер MSP430F149.

Блок-схема УФСП представлена на рис. 1.

На рис. 2 приведена фотография УФСП. Конструктивно УФСП имеет цилиндрический корпус, в котором на амортизаторах установлена плата диаметром 38 мм.

*Система координат.* На рис. 3 представлена система координат УФСП.

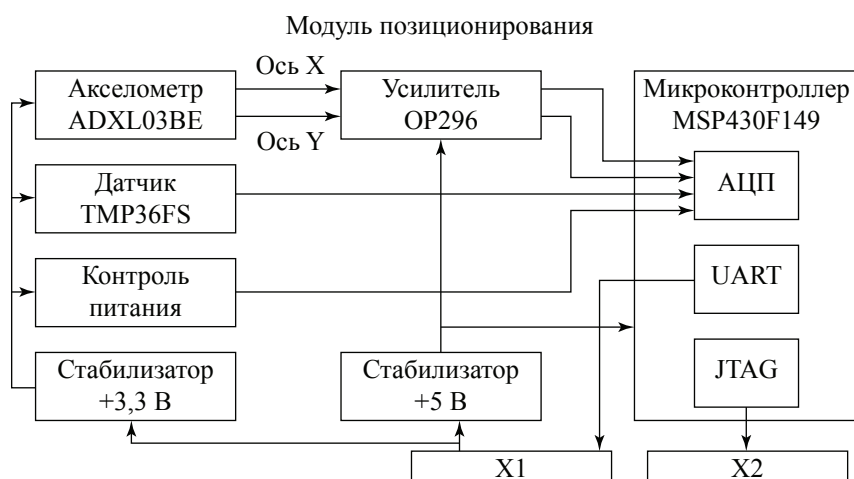


Рис. 1. Блок-схема УФСП: 1 – двухосный акселерометр; 2 – микроконтроллер MSP430F149; 3 – операционный усилитель; 4 – датчик температуры; 5 – стабилизатор напряжения +3,3В; 6 – стабилизатор напряжения +5В; 7 – микросхема; 8 – соединитель X1 для программирования; 9 – выходной соединитель X2 для передачи данных





Рис. 2. УФСП

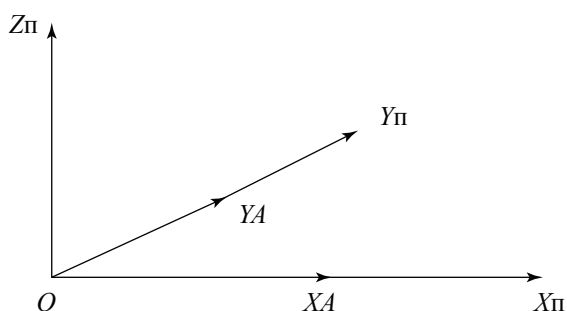


Рис. 3. Система координат УФСП:  $OX_p$  – продольная ось УФСП;  $OY_p$  – поперечная ось УФСП;  $OZ_p$  – дополняет до правой системы координат;  $OXA$ ,  $OYA$  – оси чувствительности акселерометра;

В общем случае оси чувствительности акселерометра и измерительные оси УФСП не совпадают. Рассогласование осей определяется в процессе калибровки УФСП и учитывается в алгоритме обработки информации.

**Функционирование УФСП.** Информация с акселерометра по оси  $X$  поступает на усилитель. В усилителе производится согласование уровней выходного сигнала акселерометра с рабочим уровнем АЦП микроконтроллера. Кроме этого, в усилителе производится амплитудная и частотная коррекция сигнала с акселерометра. В АЦП микроконтроллера аналоговый сигнал преобразовывается в двенадцатиразрядный цифровой код. Эта информация программно корректируется по показаниям датчика температуры, величине напряжения питания, углам рассогласования осей чувствительности акселерометра и осей УФСП, преобразуется в требуемый вид. Аналогичным образом последовательно обрабатывается

информация по оси  $Y$ , а также информация о температуре и напряжении питания. Собранная информация передается потребителю по интерфейсу RS-232. Ориентировочно информация может выдаваться с частотой 25 герц.

*Описание пакета программ.* При изготовлении унифицированной системы позиционирования необходимо провести работы по проверке работоспособности и калибровке прибора. Проведение вышеперечисленных работ требует значительных временных затрат, связанных прежде всего с переводом данных, передаваемых прибором, а также с вычислением требуемых значений параметров с высокой точностью (до восьмого знака после запятой). В разработанный «Пакет программ для демонстрации работоспособности, автоматизации процедур настройки и контроля системы позиционирования» входят следующие компоненты:

- Программа визуализации для проверки работоспособности модуля позиционирования используется после изготовления платы и монтажа основных элементов для проверки работоспособности модуля позиционирования. Также программа позволяет выполнить сравнение значений выходных напряжений микросхемы акселерометра с заранее определенными диапазонами.

- Программа калибровки акселерометра автоматизирует трудоемкий процесс калибровки.

- Программа определения коэффициента температурной чувствительности акселерометра используется с целью определения масштабных и температурных коэффициентов акселерометра и датчика температуры. Полученные значения параметров используются рабочей программой передачи данных УФСП, обеспечивая компенсацию погрешностей установки МП в корпус и изменения температуры окружающей среды при вычислениях значений угла наклона прибора и линейных ускорений относительно осей.

- Программа отображения информации УФСП используется после финишной настройки прибора и служит для демонстрации его возможностей.

- Программа визуализации для проверки работоспособности модуля позициониро-



вания (далее – программа) позволяет провести работы по проверке работоспособности прибора, а также определить диапазоны изменений выходных сигналов акселерометра. По полученной от УФСП информации проводится анализ выходных сигналов акселерометра и делается вывод о работоспособности прибора и диапазонах изменения выходных сигналов:

- в нулевом положении;
- в положении «поворот по оси  $X$  на плюс  $90^\circ$ »;
- в положении «поворот по оси  $X$  на минус  $90^\circ$ »;
- в положении «поворот по оси  $Y$  на плюс  $90^\circ$ »;
- в положении «поворот по оси  $Y$  на минус  $90^\circ$ ».

На основании всей полученной от УФСП информации проводится общая проверка работоспособности. Все промежуточные и окончательные результаты проверок документируются в пригодном для печати формате.

*Программа калибровки акселерометра* позволяет автоматизировать процесс калибровки УФСП. Калибровка проводится последовательно по осям  $X$  и  $Y$  в трех положениях: нулевом, а также в наклонных положениях с поворотом на  $90^\circ$  в положительном и отрицательном направлениях. После введения порядкового номера прибора определяется состояние процесса калибровки (калибровка не проводилась, данные по оси  $X$  получены или калибровка успешно завершена). Калибровка считается успешной, если не возникло ошибок при приеме сигнала акселерометра (ненулевой сигнал). Перед началом работы с прибором необходимо ввести напряжение питания микроконтроллера для вычисления коэффициента пересчета, используемого в рабочих формулах. Во время работы программы происходит непрерывное обращение к прибору, постоянно снимаются показания с датчика температуры. Затем полученные значения отображаются в отдельном окне в виде графика. После снятия измерений по обеим осям в каждом из трех положений производится вычисление масштабных коэффициентов и нулевых сигналов акселерометра.

Масштабные коэффициенты по угловому положению вычисляются для двух наклонов –  $+90^\circ$  и  $-90^\circ$  по обеим осям  $X$  и  $Y$  по формуле

$$K = 1 / |U_{ak} - U_{a0}|,$$

где  $U_{ak}$  – напряжение акселерометра по оси  $X$  или  $Y$  при наклоне  $+90^\circ$  или  $-90^\circ$ , а  $U_{a0}$  – напряжение акселерометра в нулевом положении по данной оси.

Масштабные коэффициенты по линейному ускорению вычисляются для двух наклонов:  $+90^\circ$  и  $-90^\circ$  по обеим осям  $X$  и  $Y$  по формуле

$$K = |U_{ak} - U_{a0}| / 9,87,$$

где  $U_{ak}$  – напряжение акселерометра по оси  $X$  или  $Y$  при наклоне  $+90^\circ$  или  $-90^\circ$ , а  $U_{a0}$  – напряжение акселерометра в нулевом положении по данной оси.

При этом программно отслеживается последовательность измерений по каждой оси в трех направлениях. Программа позволяет также получить полную информацию о проведенных измерениях отдельно для каждого прибора. Эти данные можно просмотреть в формируемых автоматически выходных текстовых файлах.

*Программа определения коэффициента температурной чувствительности акселерометра.* Программа позволяет автоматизировать процесс определения масштабного коэффициента датчика температуры и коэффициентов температурной чувствительности акселерометра относительно осей  $X$  и  $Y$ . Измерения проводятся в трех температурных режимах для каждого прибора:  $+20^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $+60^\circ\text{C}$ . После ввода порядкового номера прибора определяется состояние процесса определения коэффициентов температурной чувствительности акселерометра (тестирование не проводилось, данные при температуре окружающей среды  $+20^\circ\text{C}$  получены, данные при температурах окружающей среды  $+20^\circ\text{C}$  и  $-20^\circ\text{C}$  получены или определение коэффициента температурной чувствительности успешно завершено). Определение коэффициента температурной чувствительности акселерометра считается успешным, если не возникло ошибок при приеме сигнала акселерометра (ненулевой сигнал). Перед началом работы с прибором необходимо ввести

напряжение питания микроконтроллера для вычисления коэффициента пересчета, используемого в рабочих формулах. Во время работы программы происходит непрерывное обращение к прибору, в том числе в течение работы постоянно снимаются показания с датчика температуры. Затем полученные значения отображаются в отдельном окне в виде графика. После снятия измерений в трех температурных режимах окружающей среды производится вычисление коэффициентов температурной чувствительности акселерометра по осям  $X$  и  $Y$  и масштабного коэффициента датчика температуры.

Масштабный коэффициент датчика температуры вычисляется по формуле

$$K = 0,5 \cdot \left( \frac{U_{tmp\_h} - U_{tmp\_n}}{40} + \frac{U_{tmp\_n} - U_{tmp\_d}}{40} \right),$$

где  $U_{tmp\_h}$  – напряжение на датчике температуры при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$U_{tmp\_n}$  – при температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$U_{tmp\_d}$  – при температуре  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициенты температурной чувствительности для осей  $X$  и  $Y$  вычисляются по формуле

$$K = 0,5 \cdot \left( \frac{U_{a\_h} - U_{a\_n}}{U_{tmp\_h} - U_{tmp\_n}} + \frac{U_{a\_n} - U_{a\_d}}{U_{tmp\_n} - U_{tmp\_d}} \right),$$

где  $U_{tmp\_h}$  – напряжение на датчике температуры при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$U_{tmp\_n}$  – при температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$U_{tmp\_d}$  – при температуре  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$U_{a\_h}$ ,  $U_{a\_n}$ ,  $U_{a\_d}$  – напряжение на акселерометре по оси  $X$  или  $Y$  при температурах:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

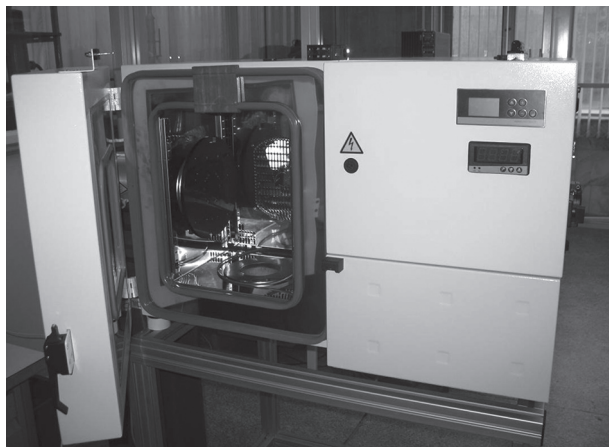


Рис. 4. Стенд AC1120C V2.3

Все данные, полученные в ходе измерений, автоматически заносятся в выходной текстовый файл, сформированный для тестируемого прибора.

Калибровка и определение коэффициентов температурной чувствительности проводится в составе стенда AC1120C V2.3. Фотография стенда приведена на рис. 4.

#### *Отображение информации УФСП.*

Программа позволяет отобразить информацию об угловом положении прибора и действующем линейном ускорении относительно осей  $X$  и  $Y$ , передаваемую УФСП. Отображение измеряемых параметров проводится в двух режимах: углового положения и линейного ускорения.

Во время работы программы микроконтроллер непрерывно снимает информацию через каналы АЦП с акселерометра, датчика температуры и контроллера питания и вычисляет угловое положение прибора и линейное ускорение относительно осей  $X$  и  $Y$ . Затем полученные данные передаются в компьютер по протоколу UART в формате целого числа без знака (unsigned).

При измерении углового положения данные отображаются в виде графиков по осям  $X$  и  $Y$  и на динамической модели, изображающей реальное угловое положение прибора. Внешний вид модели соответствует реальному прибору (рис. 5). В режиме линейного ускорения информация отображается в виде графиков. При неудачной попытке считать информацию (не подключен прибор, ошибка соединения) будет выдано сообщение об ошибке. При работе программы отображается время работы прибора в определенном режиме отображения информации.

Программа позволяет провести масштабирование полученных графических данных. Пользователь может уменьшать или увеличивать размеры динамической модели и изменять ее положение относительно осей координат.

Преимущество использования пакета программ по времени показано в таблице.

Из таблицы видно, что повышение скорости проверки с использованием программы относительно проверки вручную составляет 14 раз.

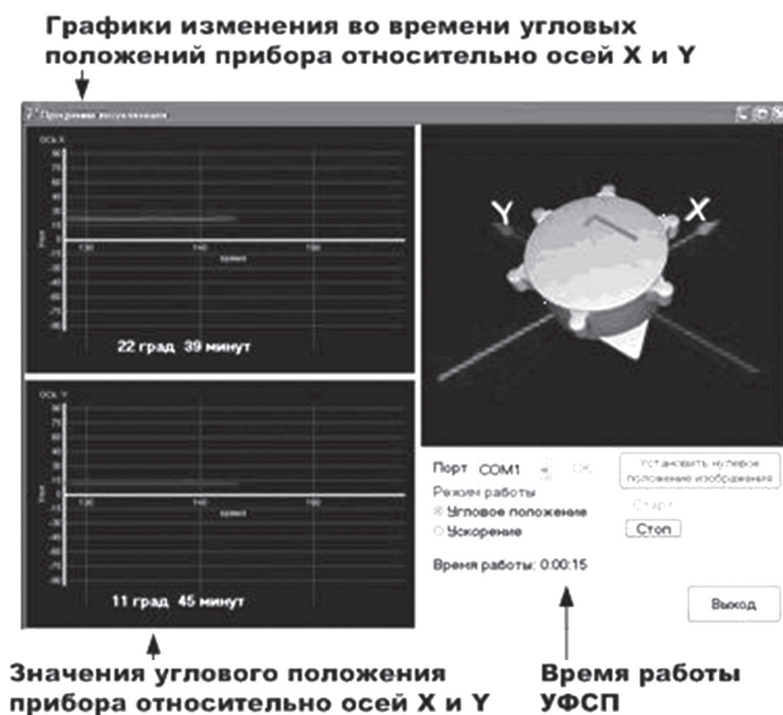


Рис. 5. Визуальная модель прибора в программе

Т а б л и ц а

**Сравнительная характеристика времени калибровки и проверки работоспособности при использовании программы и без использования средств автоматизации**

Этап	Время без использования программы (мин)	Время с использованием программы (мин)
1. Проверка УФСП	14	3
2. Калибровка УФСП	17	0,5
3. Определение коэффициентов температурной чувствительности акселерометра (не считая работы за стендом)	25	0,5
Итого	56	4

**Заключение**

Пакет программ для демонстрации работоспособности, автоматизации процедур настройки и контроля системы позиционирования значительно сокращает время проведения работ (в 14 раз) по проверке работоспособности, калибровке прибора и определению коэффициента температурной чувствительности акселерометра, гарантирует точность вычислений и не требует повышенного внимания оператора при работе с ним. Возможность сохранения и точность полученных результатов практически исключает возможность повторного проведения работ с прибором. Простой интерфейс и отсутствие сложных расчетов позволяют работать с программами сотрудникам, имеющим начальный навык работы с персональным компьютером.

**Библиографический список**

1. Ачильдиев, В.М. Микромеханические системы позиционирования на основе микромеханических акселерометров и гироскопов для наשלемых систем целеуказания и индикации / В.М. Ачильдиев, Ю.К. Грузевич, В.А. Солдатенков и др. // Вестник МГТУ им. Баумана. – 2008. – № 3.
2. Селецкая, Э.С., Биалов Р.А. и другие. Программа визуализации для проверки работоспособности модуля позиционирования. ОАО «НПО Геофизика-НВ», КНИБ.408114.002.02-01 13 01, 2008 г.
3. Недодаев, А.А., Григорьев В.А. и другие. Программа проверки работоспособности. ОАО «НПО Геофизика-НВ», КНИБ.408114.002.01-01 13 01, 2008 г.
4. Павлов, А.Е. и другие. Программа калибровки акселерометра. ОАО «НПО Геофизика-НВ», КНИБ.402113.002.01-01 13 01, 2008 г.
5. Свириденко, Ю.Н. и другие. Программа определения коэффициента температурной чувствительности акселерометра. ОАО «НПО Геофизика-НВ», КНИБ.402113.002.02-01 13 01, 2008 г.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

А.Г. КОСТЫЛЕВ, асп. каф. вычислительной техники МГУЛ

testbf@rambler.ru

Распознавание объектов в задачах обработки изображений всегда начинается с их восстановления, заключающегося в компенсации различного рода искажений [1]. Комбинация различных видов искажений требует применения соответствующих методов. Для одной и той же задачи можно использовать различные методы, но только ограниченное число методов дает удовлетворительный результат.

В работе рассматриваются вопросы определения эффективности цифровых фильтров при обработке изображений в условиях помех. Анализ работы фильтров производится на основе вычислительного эксперимента, в ходе которого восстанавливается изображение, предварительно искаженное равномерным мультипликативным шумом. Эффективность девяти типов фильтров при различных комбинациях входных параметров сравнивается на основе четырех критериев: среднеквадратичной ошибки, пикового отношения сигнал-шум, степени сохранения контуров  $\beta$ , универсального индекса качества. На примере показана обработка радиолокационного изображения фильтром Фрост, который оказался лучшим по четырем критериям.

Ниже перечислены количественные критерии, по которым оценивалось качество работы фильтров:

1. Критерий среднеквадратичной ошибки  $MSE$  (*Mean Squared Error*) [2] носит интегральный характер и совершенно не учитывает локальных особенностей изображения. Меньшее значение  $MSE$  говорит о большем сходстве исходного и восстановленного изображений.

$$MSE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I_{ij}^*)^2,$$

где  $I_{ij}$ ,  $I_{ij}^*$  – исходное и восстановленное изображение;

$M$ ,  $N$  – размеры изображения.

2. Пиковое отношение сигнал-шум  $PSNR$  (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) [2] характеризует превышение уровня полезного сигнала над уровнем шума в диапазоне пред-

ставления элементов изображения. Большее значение  $PSNR$  означает лучшую степень подавления шума.

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\max_I}{\sqrt{MSE}} \right),$$

где  $\max_I$  – максимально возможное значение элемента изображения  $I$  из диапазона представления;

$MSE$  – среднеквадратичная ошибка.

3. Степень сохранения контуров  $\beta$  [4] учитывает локальные особенности изображения. Контурные области являются одними из наиболее информативных признаков при анализе изображений [3], поэтому целесообразно по возможности избегать их размытия в процессе фильтрации.

Критерий  $\beta$  принимает значения из диапазона  $[0; 1]$ . Когда  $\beta = 1$  контур полностью сохранен, при  $\beta = 0$  – размыт. Промежуточные значения  $\beta$  из диапазона  $[0; 1]$  отражают степень сохранения контурной информации.

$$\beta = \frac{\Gamma(\Delta I - \Delta \bar{I}, \Delta I^* - \Delta \bar{I}^*)}{\sqrt{\Gamma(\Delta I - \Delta \bar{I}, \Delta I - \Delta \bar{I}) \cdot \Gamma(\Delta I^* - \Delta \bar{I}^*, \Delta I^* - \Delta \bar{I}^*)}},$$

где оператор поэлементного умножения

$$\Gamma(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{1ij} \cdot I_{2ij},$$

$\Delta I$  – фильтр Лапласа размером 3Ч3 пикселей [3].

4. Универсальный индекс качества (УИК) имеет способность определенным образом учитывать различные виды искажений. К тому же УИК позволяет различать изображения, имеющие одинаковые значения  $MSE$  и  $PSNR$ . Оценка качества восстановления изображений с помощью УИК совпадает с экспертными оценками [2].

$$УИК = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \cdot \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \cdot \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2},$$

где  $x$ ,  $y$  – одномерные числовые последовательности;

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – математические ожидания;

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – среднеквадратические отклонения;

$\sigma_{xy}$  – коэффициент корреляции.



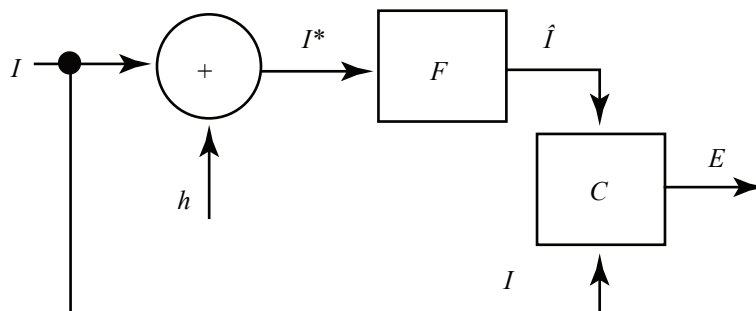


Рис. 1. Схема оценки эффективности фильтров

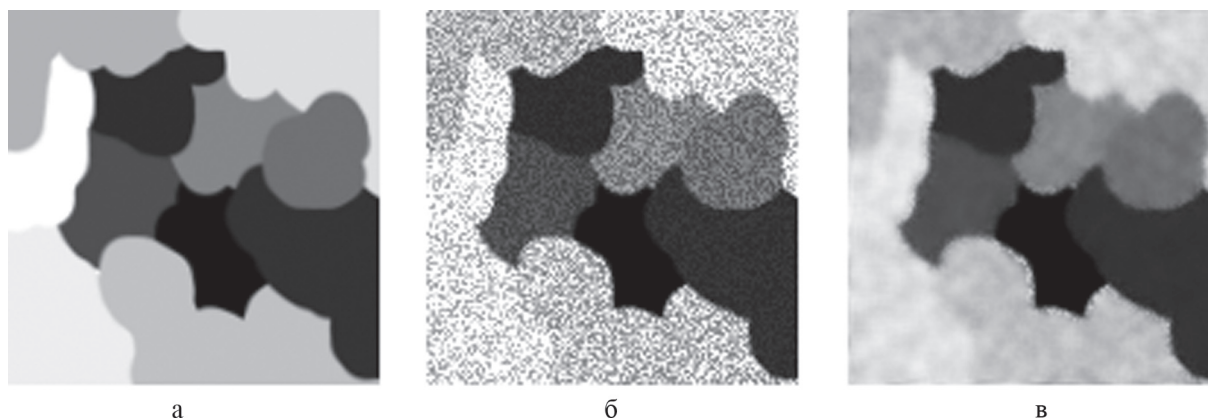


Рис. 2. Тестовые изображения: а) исходное; б) искаженное; в) восстановленное

В [3] представлен алгоритм расчета УИК для случая изображений.

Оценку эффективности с использованием вышеперечисленных критериев проводим следующим образом: исходное изображение  $I$  подвергается воздействию шума  $h$ , полученное искаженное изображение  $I^*$  подаем на вход оцениваемого фильтра  $F$ . Эффективность  $E$  фильтра  $F$  как результат сравнения восстановленного изображения  $\hat{I}$  с исходным  $I$  на основе критерия оценки  $C$  записываем в таблице (рис. 1).

На рис. 2 показаны тестовые изображения, использованные в эксперименте. Исходное изображение (рис. 2 а) представляет собой комбинацию пятен различных градаций серого цвета. Искаженное изображение (рис. 2 б) получается из исходного на основе модели мультипликативного шума

$$I^* = I + hI,$$

где  $h$  – равномерно распределенная случайная величина с математическим ожиданием 0 и дисперсией 0,04. На рис. 2 в искаженное изображение восстановлено с помощью фильтра Фрост с маской  $7 \times 7$  пикселей. Размеры изображений составляют  $127 \times 128$  пикселей.

Требуется на основе критериев выбрать фильтр, наилучшим образом компенсирующий влияние шума. В работе рассматриваются пространственные фильтры, поэтому для всех, кроме одного, задается размер маски.

Каждый из девяти типов фильтров исследуется при четырех комбинациях входных параметров. Результаты применения схемы на рис. 1 представлены в таблице.

Анализ значений параметров в таблице показывает, что для всех типов фильтров характерно ухудшение выходных характеристик при увеличении размеров маски, начиная с 7 пикселей. Это объясняется повышением разнообразия значений пикселей в пределах маски, что приводит к размытию изображения.

Так как входное изображение представляет собой набор однородных областей, искаженных равномерным мультипликативным шумом, то целесообразно изображения такого класса восстанавливать с помощью фильтра Фроста. При этом обеспечивается как высокое подавление шумов, так и сохранение контурной информации.

Оценка эффективности фильтров изображений

Фильтры			Критерии оценки эффективности фильтров			
Тип	Маска	Параметры	MSE	PSNR	УИК	$\beta$
Среднее [3]	3 × 3		0,0028	25,5575	0,9788	0,3206
	5 × 5		0,0034	24,7190	0,9772	0,1493
	7 × 7		0,0048	23,1484	0,9688	0,0755
	9 × 9		0,0065	21,8424	0,9583	0,0594
Гауссиан [3]	3 × 3	$\sigma = 0,5$	0,0059	22,3014	0,9541	0,2346
	5 × 5	$\sigma = 0,5$	0,0059	22,3083	0,9542	0,2346
	7 × 7	$\sigma = 1,0$	0,0026	25,8532	0,9807	0,5039
	9 × 9	$\sigma = 1,0$	0,0039	24,0343	0,9744	0,3939
Винера [3]	3 × 3		0,0034	24,6366	0,9723	0,3694
	5 × 5		0,0032	24,9514	0,9743	0,3679
	7 × 7		0,0040	23,9318	0,9684	0,3124
	9 × 9		0,0052	22,8632	0,9610	0,2727
Медианный [3]	3 × 3		0,0041	23,8424	0,9665	0,3162
	5 × 5		0,0026	25,8739	0,9785	0,3972
	7 × 7		0,0026	25,8291	0,9803	0,4431
	9 × 9		0,0033	24,7971	0,9774	0,4103
Кувахара [5]	5 × 5		0,0036	24,4251	0,9747	0,4560
	9 × 9		0,0045	23,5110	0,9753	0,3259
	13 × 13		0,0072	21,4032	0,9637	0,1366
	17 × 17		0,0104	19,8330	0,9484	0,0596
SRAD [6]		$T = 1$	0,0092	20,3790	0,9316	0,1714
		$T = 3$	0,0048	23,1520	0,9618	0,2062
		$T = 5$	0,0035	24,5566	0,9728	0,2641
		$T = 7$	0,0034	24,6607	0,9744	0,3169
Куан [7]	3 × 3		0,0028	25,5575	0,9788	0,3206
	5 × 5		0,0034	24,7186	0,9773	0,1430
	7 × 7		0,0048	23,1481	0,9688	0,0775
	9 × 9		0,0065	21,8405	0,9582	0,0626
Ли [8]	3 × 3		0,0028	25,5775	0,9788	0,3206
	5 × 5		0,0028	25,5159	0,9795	0,1430
	7 × 7		0,0042	23,8124	0,9722	0,0775
	9 × 9		0,0058	22,3426	0,9619	0,0626
Фрост [9]	3 × 3	$K = 1/3$	0,0021	26,7966	0,9856	0,5573
	5 × 5	$K = 1/5$	0,0023	26,4410	0,9841	0,6484
	7 × 7	$K = 1/7$	0,0020	26,9168	0,9860	0,6635
	9 × 9	$K = 1/9$	0,0021	26,7966	0,9856	0,5573

На рис. 3 а радиолокационное изображение земной поверхности содержит как однородные области открытых участков местности, так и области с большим количеством мелких элементов – хозяйственные объекты. Все изображение искажено спекл-шумом. После обработки фильтром Фрост на рис. 3 б заметно уменьшилась зернистость, что визуально воспринимается лучше. При этом контуры объектов остались высокоразличимыми.

Таким образом, повышение качества восстановления можно достигнуть, если предварительно оценивать параметры шума на однородных по интенсивности участках изображений. Тогда на основе набора параметров станет возможным определять класс шума. Шумы в пределах одного класса целесообразно подавлять с помощью своего предварительно настроенного алгоритма фильтрации.





а



б

Рис. 3. Фильтрация радиолокационного изображения: а) исходное радиолокационное изображение; б) изображение, обработанное фильтром Фрост с маской 7×7 пикселей

### Библиографический список

1. Методы компьютерной обработки изображений – 2-е изд., испр. / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
2. Куйкин, Д.К. Оценка качества цифровых изображений в программном комплексе Piclab / Д.К. Куйкин, С.А. Арляпов, В.А. Бекренев // Новые информационные технологии: Тез. докл. XIV межд. студенческой школы-семинара. – М.: МГИЭМ, 2006. – 489 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
4. Image enhancement based on a nonlinear multiscale method / F. Sattar [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. – 1997. – Vol. 6, № 6. – P. 888–895.
5. Yu, Y. Speckle Reducing Anisotropic Diffusion / Y. Yu, S. T. Acton // IEEE Transactions on Image Processing. – 2002. – Vol. 11, № 11. – P. 1260–1270.
6. Young I. T. Fundamentals of Image Processing. I. T. Young, J. J. Gerbrands, L. J. van Vliet; Delft University of Technology. – Delft: TUDelft, 1998. – 113 p.
7. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise / D. T. Kuan [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1985. Vol. 7. – P. 165–177.
8. Lee, J.-S. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics / J.-S. Lee // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1980. Vol. PAMI-2, № 2. – P. 165–168.
9. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise / V. S. Frost [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1982. Vol. 4, № 2. – P. 157–166.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЙТИНГОВЫХ ОЦЕНОК ОБЪЕКТОВ С КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

О.М. ПОЛЕЩУК, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, д-р техн. наук*

*olga.pol@ci.net.ru*

Работа представляет метод определения рейтинговых оценок с качественными характеристиками. Новизна этого метода состоит в том, что автор использует лингвистические шкалы, что позволяет формализовать значения характеристик с помощью теории нечетких множеств. Как результат появляется возможность корректно оперировать с различными характеристиками на едином универсальном пространстве и получать устойчивые конечные результаты. Полученные рейтинговые оценки предлагается использовать в задачах принятия решений на основе экспертных мнений.

Рейтинговые системы широко используются в различных областях деятельности человека (образовательный процесс, экономика, техника и т.д.) и играют важную роль в задачах принятия решений. Эти системы позволяют получать доступную и своевременную информацию в виде некоего интегрального показателя, который используется для принятия ряда управленческих решений. Качественные признаки, как правило, измеряются в разных шкалах и часто являются несопоставимыми по сути, поэтому представляется проблематичным получение рейтинговых оценок на основе традиционных сверток отдельных показателей. Избежать возникающих проблем при построении рейтинговых систем позволяет теория нечетких множеств. Представление отдельных показателей в виде нечетких множеств, определенных на едином универсальном множестве, корректность оперирования с их функциями принадлежности обеспечивает получение адекватных и устойчивых рейтинговых оценок.

Первой задачей при построении рейтинговых оценок с качественными характеристиками является задача формализации полученных при их оценивании данных. Решение этой задачи состоит в построении на едином универсальном пространстве моделей экспертного оценивания характеристик. С

позиции аппарата теории нечетких множеств такими моделями могут служить полные ортогональные семантические пространства, а задача их построения решена в [1].

Одним из основных понятий теории нечетких множеств является понятие нечеткой переменной [2]. *Нечеткой переменной* называется тройка

$$\{X, U, \tilde{A}\},$$

где  $X$  – название переменной;

$U$  – область ее определения (универсальное множество);

$\tilde{A}$  – нечеткое множество универсального множества, описывающее возможные значения нечеткой переменной.

На основе понятия нечеткой переменной вводится понятие лингвистической переменной. *Лингвистической переменной* называется пятерка

$$\{X, T(X), U, V, S\},$$

где  $X$  – название переменной;

$T(X) = \{X_i, i = \overline{1, m}\}$  – терм-множество переменной  $X$ , то есть множество термов или названий лингвистических значений переменной  $X$  (каждое из этих значений – нечеткая переменная со значениями из универсального множества  $U$ );

$V$  – синтаксическое правило, порождающее названия значений лингвистической переменной  $X$ ;

$S$  – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной с названием из  $T(X)$  нечеткое подмножество универсального множества  $U$ .

Термы  $X_i, i = \overline{1, m}$  называют понятиями, которые образуют лингвистическую переменную.

В качестве примера лингвистической переменной можно привести лингвистическую переменную с названием «знания», изображенную на рисунке.

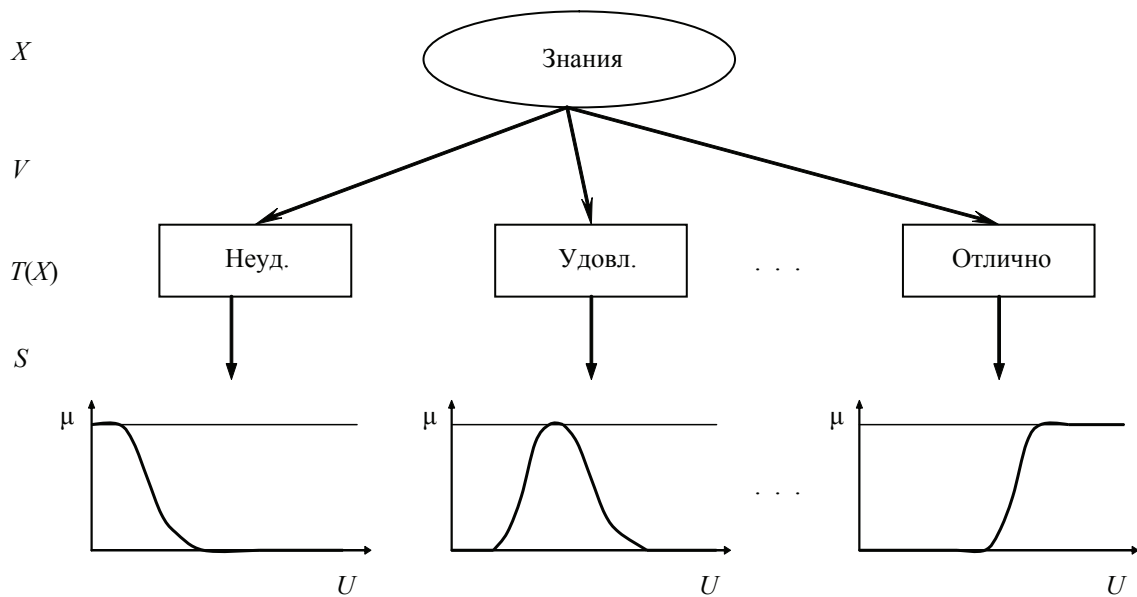


Рисунок. Лингвистическая переменная «знания»

Семантическим пространством называется лингвистическая переменная с фиксированным терм-множеством  $\{X, T(X), U, S\}$ .

С позиции аппарата теории нечетких множеств моделями экспертного оценивания признаков служат семантические пространства, имеющие широкий спектр практических применений. Проведенные теоретические исследования свойств семантических пространств, направленные на повышение адекватности моделей экспертного оценивания признаков и их полезности для решения практических задач, позволили обоснованно сформулировать требования к функциям принадлежности  $\mu_l(x)$ ,  $l = \overline{1, m}$  их терм-множеств [3].

1. Для каждого понятия  $X_l$ ,  $l = \overline{1, m}$  существует  $\tilde{U}_l \neq \emptyset$ , где  $\tilde{U}_l = \{x \in U : \mu_l(x) = 1\}$  есть точка или отрезок.

2. Пусть  $\tilde{U}_l = \{x \in U : \mu_l(x) = 1\}$ , тогда  $\mu_l(x)$ ,  $l = \overline{1, m}$  не убывает слева от  $\tilde{U}_l$  и не возрастает справа от  $\tilde{U}_l$ .

3.  $\mu_l(x)$ ,  $l = \overline{1, m}$  имеют не более двух точек разрыва первого рода.

4. Для каждого

$$x \in U \sum_{l=1}^m \mu_l(x) = 1.$$

Семантические пространства, функции принадлежности которых удовлетворяют сформулированным требованиям, получили название полных ортогональных семантических пространств (ПОСП).

В настоящей работе предлагается использовать ПОСП для построения рейтинговых систем оценивания объектов с качественными характеристиками.

Рассмотрим совокупность  $N$  объектов, у которых оцениваются характеристики  $X_j$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Пусть  $X_{lj}$ ,  $l = \overline{1, m_j}$  уровни вербальных шкал, применяемых соответственно для их оценивания. Обозначим через  $\mu_{lj}(x)$  функцию принадлежности нечеткого числа  $\tilde{X}_{lj}$ , соответствующего  $l$ -му терму  $j$ -ой лингвистической переменной,  $l = \overline{1, m_j}$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Будем называть оценками нечеткие числа  $\tilde{X}_{lj}$ ,  $l = \overline{1, m_j}$ ,  $j = \overline{1, k}$  или их функции принадлежности  $\mu_{lj}(x)$ ,  $l = \overline{1, m_j}$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Обозначим через  $\tilde{X}_j^n$  и  $\mu_j^n(x) \equiv (a_{j1}^n, a_{j2}^n, a_{jL}^n, a_{jR}^n)$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , оценку характеристики  $X_j$  у  $n$ -го объекта. Нечеткое число  $\tilde{X}_j^n$  с функцией принадлежности  $\mu_j^n(x)$  равно одному из нечетких чисел  $\tilde{X}_{lj}$ ,  $l = \overline{1, m_j}$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Обозначим весовые коэффициенты оцениваемых характеристик через  $\omega_j$ ,  $j = \overline{1, k}$ ,

$$\sum_{j=1}^k \omega_j = 1.$$

Нечеткая рейтинговая оценка  $n$ -го объекта,  $n = \overline{1, N}$  в рамках характеристик  $X_j$ ,  $j = \overline{1, k}$  определяется в виде нечеткого числа  $\tilde{A}_n = \omega_1 \otimes \tilde{X}_1^n \oplus \dots \oplus \omega_k \otimes \tilde{X}_k^n$  с функцией принадлежности

$$\mu_n(x) \equiv \left( \sum_{j=1}^k \omega_j a_{j1}^n, \sum_{j=1}^k \omega_j a_{j2}^n, \sum_{j=1}^k \omega_j a_{jL}^n, \sum_{j=1}^k \omega_j a_{jR}^n \right),$$

$$n = \overline{1, N}.$$



При уровне доверия  $\mu_n(x_n) \geq \alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$  получаем

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^k \omega_j a_{j1}^n - (1-\alpha) \sum_{j=1}^k \omega_j a_{jL}^n &\leq x_n \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^k \omega_j a_{j2}^n + (1-\alpha) \sum_{j=1}^k \omega_j a_{jR}^n. \end{aligned}$$

Полученные нечеткие рейтинговые оценки предлагается использовать для клас-теризации объектов на основе экспертных высказываний относительно важности тех или иных характеристик для соответствующего кластера [4]. Примером таких высказываний может быть высказывание следующего типа: «Для принадлежности объекта к  $i$ -му кластеру не очень важны характеристики из первой группы, довольно важны характеристики из второй группы, ... и очень важны характеристики из  $v$ -ой группы»,  $i = 1, r$ .

Обозначим через  $\tilde{A}_n^1, \dots, \tilde{A}_n^v$  соответственно нечеткие рейтинговые оценки  $n$ -го объекта для первой, второй и так далее  $r$ -ой групп характеристик. Тогда согласно экспертному высказыванию нечеткой оценкой  $n$ -го объекта в рамках  $i$ -го кластера будет являться нечеткое число  $\tilde{R}_n^i$ :  $\tilde{R}_n^i \equiv \tilde{C}_3 \otimes \tilde{A}_n^1 \oplus \tilde{C}_4 \otimes \tilde{A}_n^2 \oplus \dots \oplus \tilde{C}_6 \otimes \tilde{A}_n^v$ ,  $n = 1, N$ ,  $i = 1, r$  с функцией принадлежности  $\mu_n^i(x)$ . Для остальных кластеров рейтинговые оценки для всех объектов находятся аналогично в

соответствии с экспертными высказываниями. Сравнение полученных результатов производится на основе  $\tilde{R}_n^i$ ,  $n = 1, N$ ,  $i = 1, r$ . Для этого определяются нечеткие множества  $I^i$ ,  $i = 1, r$ , заданные на множестве индексов  $\{1, 2, \dots, N\}$ . Значения функций принадлежности  $\mu_i(n)$  этих множеств интерпретированы как степени принадлежности  $n$ -го объекта к  $i$ -му кластеру. Если  $\sup x : \mu_n^i(x) = 1$ ,  $n = 1, N$  принадлежит  $\tilde{R}_k^i(x)$ , то  $k$ -й объект считается типичным представителем  $i$ -ого кластера. Значения  $\mu_i(n)$ ,  $n = 1, N$  при  $n \neq k$  вычисляются следующим образом

$$\mu_i(n) = \max_x \min(\mu_{R_j^i}(x), \mu_{R_k^i}(x)).$$

### Библиографический список

1. Полещук, О.М. Математическая модель обработки экспертных оценок / О.М. Полещук // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2005. – № 6 (42). – С. 161–164.
2. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Полещук, О.М. Методы и модели обработки нечеткой экспертной информации / О.М. Полещук, Е.Г. Комаров. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 288 с.
4. Polshuk O.M., Komarov E.G. The determination of students' rating points on fuzzy formalization of initial information basis // Education, science and economics at universities. Integration to international education area. Plock, Poland, 2008, Pp. 67–73.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ БИОМЕТРИЧЕСКИХ И ПРОДУКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Ю.С. ГАЛКИН, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,  
В.С. ШАЛАЕВ, проф., директор ИСИЛ, д-р техн. наук,  
Ю.П. БАТЫРЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук,  
В.Н. ПОТАПОВ, асп. каф. физики МГУЛ,  
В.П. СЕМЕНОВА, асп. каф. геодезии МГУЛ,  
Ч.Д. ЭСАНАЛИЕВ, инж. каф. физики МГУЛ

*galkin@mgul.ac.ru, caf-physics@mgul.ac.ru*

Методики применения космического мониторинга для нужд лесной отрасли в настоящее время достаточно глубоко проработаны [1] и широко применяются для решения практических задач на всей территории нашей страны [2].

Однако существующие пакеты программ обработки космических снимков (ERDAS, ENVI, ScanEx и др.) дают не всю подробную информацию о лесном древостое, особенно количественную – дендрометрическую и продукционную, которая интере-

сует практиков. В данной работе изложены результаты разработки дополнительных программных модулей к одному из широко используемых пакетов программ для обработки космической информации (ENVI).

Как показано в классической работе [1], биометрические и продукционные характеристики растительности функционально зависят от многих дешифровочных показателей. Нами принята формула, представленная в работе [3], где указана зависимость биометрических характеристик от густоты произрастания, т.е. числа растений на единице площади. Коэффициенты в формулах взяты из справочника [4] (табл. 1).

Указанную густоту произрастания из космического снимка можно определить непосредственным подсчетом вершин растений или измерением средней ширины кроны.

Для отработки технологии определения искомых характеристик был использован космический снимок высокого пространственного разрешения (Quick Bird), предоставленный Научным центром аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС».

С учетом разрешающей способности конкретного снимка и условий съемки,

в нашем случае, густоту древостоя можно определить по числу деревьев на единицу площади. Принцип автоматического определения густоты растительности, т.е. количества деревьев на гектаре площади (рис. 1.). На рисунке приведены изображения вершин деревьев на космическом снимке, оптимизированные по увеличению для наиболее точного подсчета числа вершин. Густота растительного покрова вычисляется из пропорции относительно счетного участка по следующему соотношению

$$\text{Густота леса} = \frac{\text{количество деревьев в ROI} \cdot 10000 \text{ м}^2}{\text{площадь ROI м}^2},$$

где ROI – область интереса, выделенная для определения биометрических и продукционных характеристик.

Определение биометрических характеристик – эта функция позволяет с помощью данных, полученных со снимка, определить такие характеристики, как густота леса, относительная полнота насаждений, диаметр дерева, высота дерева, относительная высота дерева, протяженность кроны, сумма площадей поперечного сечения.

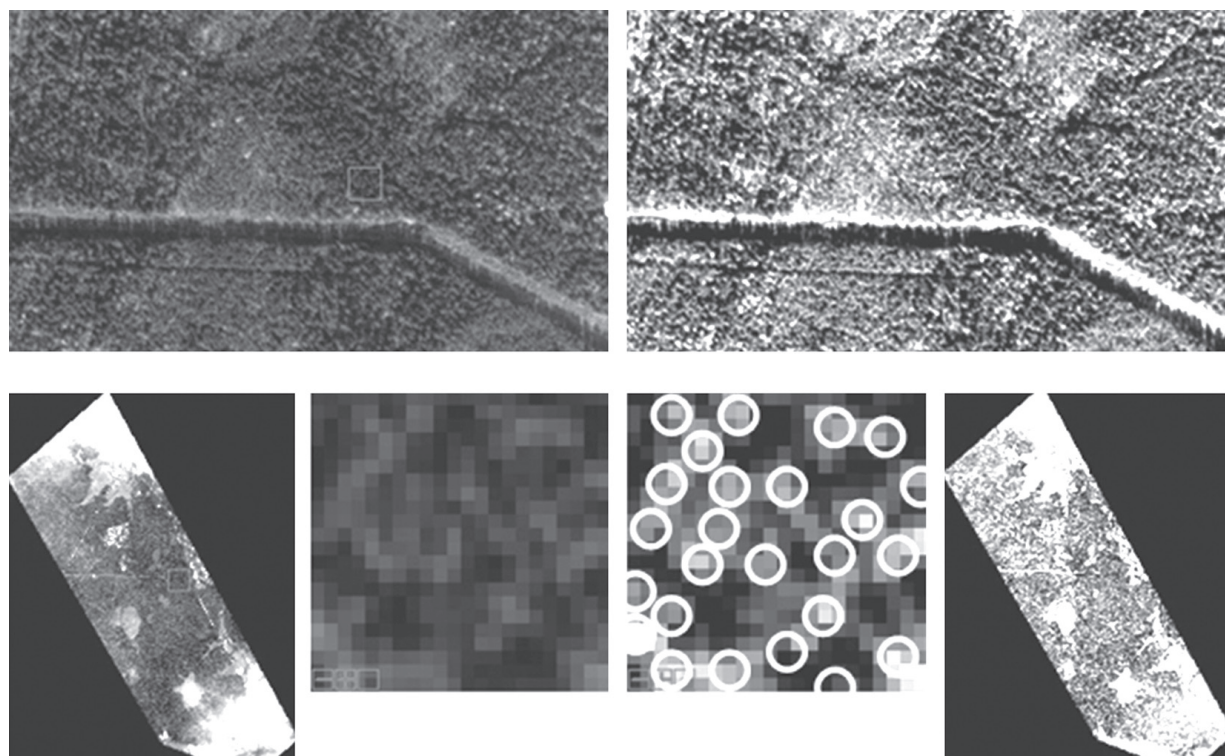


Рис. 1. Вершины деревьев в естественных цветах (слева) и в инфракрасном спектре (справа) спутникового снимка

**Основные биометрические и таксационные характеристики лесного биогеоценоза**

Биометрическая характеристика леса	Краткое описание биометрической характеристики	Зависимость характеристики от густоты леса ( $x$ )	Коэффициент корреляции
Относительная полнота насаждений ( $y$ )	Характеризует эффективность использования ресурсов окружающей среды при формировании древесной продукции. Этот показатель при определенных условиях может иметь оптимальное значение, при котором густота леса будет давать максимальную продукцию. Он изменяется от 0.2-0.4 для низкогустотных ценозов до 0.8 у ценозов с предельной относительной полнотой	$y = 0,0039x^{0,51}$	0,92
Диаметр дерева ( $D$ )	От диаметра дерева зависит уровень его конкурентоспособности за ресурсы среды с другими деревьями и травяно-кустарниковым покровом	$D = 79,7x^{-0,35}$	0,88
Высота дерева ( $H$ )	Это эколого-фитоценологическая характеристика лесной экосистемы, которая служит индикатором конкуренции между соседними деревьями за свет, воду и минеральные вещества почвы	$H = 50,2x^{-0,26}$	0,73
Относительная высота деревьев	Рассчитывается как отношение высоты дерева на уровне груди среднего роста человека к диаметру. Отражает ценотические особенности роста и формообразования стволов деревьев	$H / D = 63,6x^{0,1}$	0,61
Протяженность кроны ( $L$ )	Является показателем положения дерева в ценозе, характеризует его фитомассу и отражает уровень конкуренции деревьев за свет	$L = 26,3x^{-0,3}$	0,77
Сумма площадей поперечного сечения ( $S$ ) и запас древесины ( $\sigma$ )	Является основным показателем продуктивности стволовой массы древостоя. Наблюдается эффект, выраженный в возрастании суммы площадей поперечных сечений при увеличении густоты, хотя при этом площадь сечения отдельного дерева уменьшается	$S = 0,48x^{0,3}$ $\sigma = 7 \cdot 10^{-8}x^2 + 3,3 \cdot 10^{-3}x + 0,14$	0,63 $R = 0,82$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что по снимкам с разрешением порядка двух метров с приемлемой точностью можно определить биометрические и продукционные характеристики согласно таблице, на основе приведенных в ней функциональных зависимостей. Коэффициенты и показатели в функциях были приведены к значениям, характерным для хода роста естественных древостоев в центральном районе.

Для оценки точности космического эксперимента по определению биометрических и продукционных характеристик растительности были использованы результаты наземной таксации по базе ГИС «Центролес-

проекта» одном из подмосковных лесхозов (Танинском). Путем полевого обследования были выбраны выделы, имеющие наибольшую представительность по выявленным типам пород.

На рис. 2 приведен пример определения биометрических и продукционных характеристик для 38 выдела 49 квартала. Преобладающей породой в этом выделе является береза.

Аналогичные вычисления могут быть проведены для любого выдела, на котором фиксируется структура растительного покрова. На рис. 3 приведен пример вычислений для 44 выдела 49 квартала, где преобладающей породой является сосна.



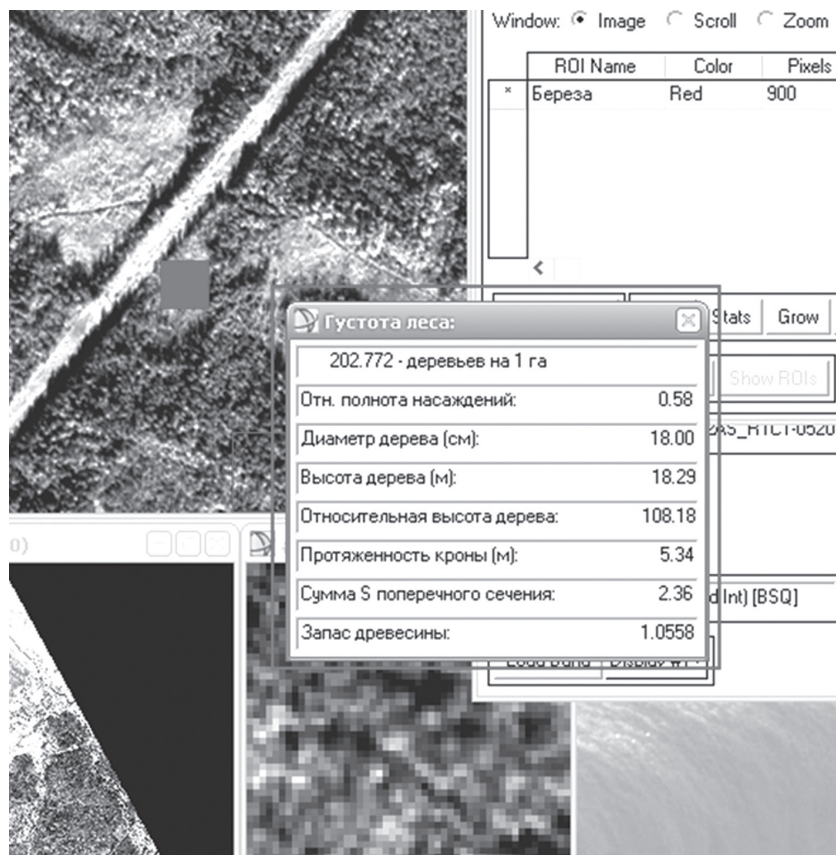


Рис. 2. Определение биометрических характеристик растительности на 36 выделе 49 квартала (береза)

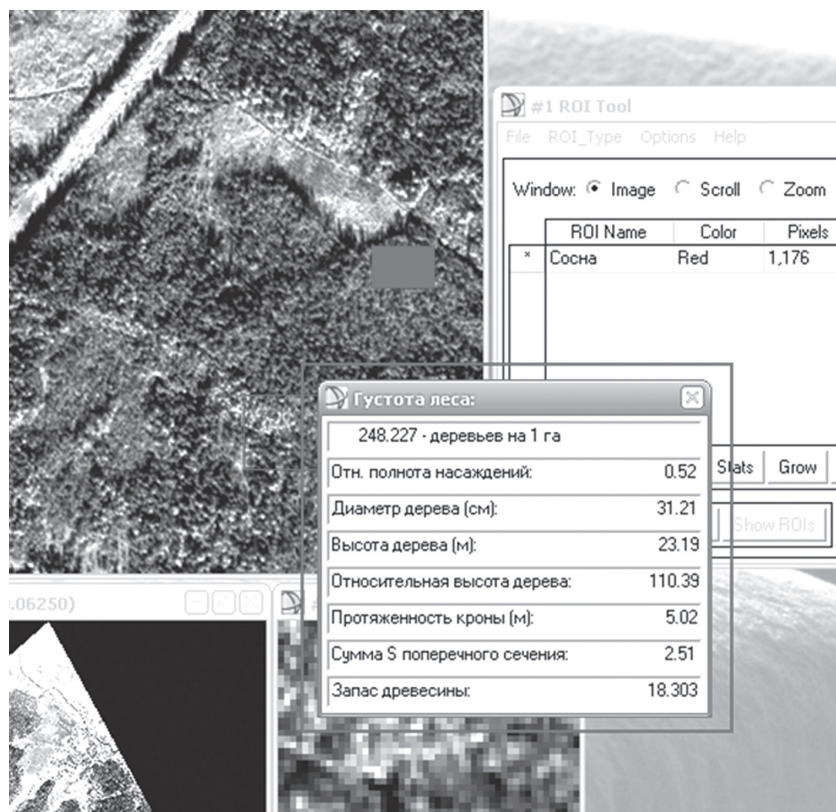


Рис. 3. Определение биометрических характеристик растительности на 44 выделе 49 квартала (сосна)

**Сравнение биометрических характеристик на 36 выделе 49 квартала**

Характеристика	Определение по снимку	Определение по базе
Относительная полнота насаждений	0,58	0,6
Диаметр дерева, см	18,00	16,7
Высота дерева, м	18,29	17
Относительная высота дерева	108,18	–
Протяженность кроны, м	5,34	–
Сумма поперечного сечения	2,36	–
Запас древесины	1,06	1

**Сравнение биометрических характеристик на 44 выделе 49 квартала**

Характеристика	Определение по снимку	Определение по базе
Относительная полнота насаждений	0,52	0,5
Диаметр дерева, см	31,21	33
Высота дерева, м	23,19	23,5
Относительная высота дерева	110,39	–
Протяженность кроны, м	5,02	–
Сумма поперечного сечения	2,51	–
Запас древесины	18,30	19,2

В табл. 2 и 3 приведены сравнения автоматически рассчитанных по космическому снимку биометрических и продукционных характеристик выбранных типов растительности (березы и сосны соответственно) и соответствующих данных выбранных тестовых участков, взятых из базы данных на тестовый полигон.

Таким образом, экспериментально доказано не только решение поставленной задачи – автоматизированное определение биометрических и продукционных характеристик растительности, но и показана точность определения, достаточная для решения ряда практических задач.

Работа выполнена при поддержке Агентства по инновациям и технологиям Минобрнауки

**Библиографический список**

1. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.
2. Маслов, А.А. Космический мониторинг лесов России: современное состояние, проблемы и перспективы / А.А. Маслов // Лесной бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 8–13.
3. Бурков, В.Д. Экоинформатика / В.Д. Бурков, В.Ф. Крапивин. – М.: МГУЛ, 2009. – 430 с.
4. Загреев, В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко и др. – М.: Колос, 1992. – 495 с.

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО МИКРОАППАРАТА

В.М. АЧИЛЬДИЕВ, доц., гл. конструктор ОАО «НПО Геофизика-НВ»,

В.В. ВОРОБУШКИН, гл. специалист ФГУП «ЦЭНКИ»,

В.Г. ДОМРАЧЕВ, проф. каф. электроники и микропроцессорной техники МГУЛ, д-р техн. наук,

В.А. ЕСАКОВ, проф. каф. систем автоматического управления МГУЛ, канд. техн. наук,

Н.М. ИВАНОВ, проф. каф. систем автоматического управления МГУЛ, д-р техн. наук,

А.Н. НАУМОВ, доц. каф. систем автоматического управления МГУЛ, канд. техн. наук

*glmnems@geo-nv.ru, vorobushkin@inbox.ru*

Сегодня наблюдается потребность в технических средствах для мониторинга состояния Земли, технических систем и объектов, включая движущиеся объекты. Одним из наиболее эффективных способов решения задачи детального мониторинга локальных районов, движущихся объектов являются мобильные комплексы авианаблюдений при проведении видеосъемок с борта летательного микроаппарата (ЛМА).

Мобильный комплекс авианаблюдения (МКА) предназначен для проведения видеомониторинга заданного района с использованием видеокамеры, устанавливаемой на борту автономно управляемого ЛМА и системы передачи видеоизображения по радиоканалу на наземный комплекс управления с выводом изображения на монитор мобильного персонального компьютера [1]. В зависимости от решаемых задач состав мобильного комплекса авианаблюдений может быть различен. Так, в случае использования МКА в чрезвычайных ситуациях, когда требуется вести наблюдения в достаточно большом регионе местности и в нескольких зонах, МКА может быть реализован на основе вездехода с несколькими рабочими местами для подготовки полетного задания и операторов видеонаблюдения. В этом случае унифицированный МКА содержит мобильный наземный комплекс планирования полетных заданий и управления, размещенный в специальном автомобиле, автоматизированную телекоммуникационную воздушную платформу [8, 9] и автономно пилотируемые летательные микроаппараты. Наземный комплекс планирования полетных заданий и управления размещен в кузове специального автомобиля и содержит не менее трех автоматизированных

рабочих мест для подготовки рабочих цифровых карт местности, маршрута полета, полетных данных и загрузки полетных данных на бортовые запоминающие устройства ЛМА.

Персональный МКА выполнен на базе специального переносного компьютера, обеспечивающего управление ЛМА вне автомобиля. Для удобства транспортировки МКА размещается в транспортном контейнере. Фотография МКА в составе транспортного контейнера приведена на рис. 1.



Рис. 1. Фотография МКА в составе транспортного контейнера

В состав персонального мобильного комплекса авианаблюдений (МКА) входят: летательный микроаппарат, наземный комплекс управления и транспортный контейнер с аксессуарами.

Наземный комплекс управления (НКУ) содержит мобильный персональный компьютер; интегрированную бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС); приемник видеоизображения;



приемник-передатчик команд управления и информации. НКУ предназначен для обработки информации, получаемой от датчиков внешней информации и видеокамеры, устанавливаемых на борту ЛМА. Получаемая с ЛМА служебная и целевая информация аккумулируется в НКУ с целью последующей обработки, а также визуально отображается на дисплее мобильного персонального компьютера в реальном масштабе времени. НКУ обслуживается одним оператором, который осуществляет ввод электронной карты района мониторинга, полетного задания и режимы управления отображением информации, используя стандартные средства мобильного персонального компьютера. Фотография НКУ на основе ноутбука приведена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография наземного комплекса управления

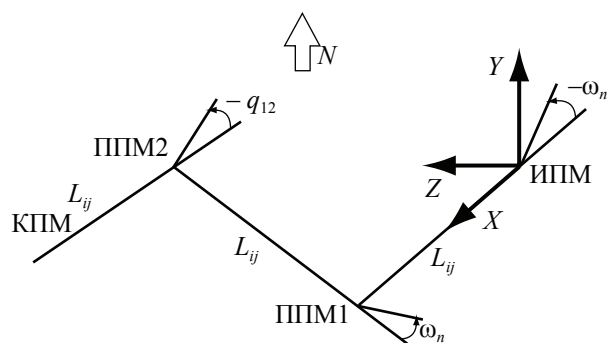


Рис. 3. Примерный вид трассы полета ЛМА. ИПМ, ППМ, КПМ – исходный пункт маршрута, промежуточный пункт маршрута, конечный пункт маршрута соответственно

Решение целевых и служебных задач осуществляется на основе картографической информации для исследуемого района, вводимой оператором. Формирование оператором требуемой трассы полета ЛМА осуществля-

ется путем передачи с наземного комплекса на борт ЛМА по радиоканалу координат очередных точек маршрута движения ЛМА [2, 3]. Примерный вид трассы приведен на рис. 3.

Для каждой точки маршрута задаются координаты долготы, широты, высоты, курсовой угол и скорость полета. Основным режимом полета является автоматический автономный полет по заданному маршруту. В процессе полета оператор имеет возможность прервать автоматический полет, перейти на режим радиуправления или изменить параметры маршрута движения.

Картографическая привязка текущих видеоизображений наблюдаемой местности ЛМА и НКУ осуществляется с использованием системы картографического обеспечения геоинформационной системы ГИС «Карта 2000», навигационной информации, вырабатываемой НКУ, и навигационной информации о параметрах текущего движения ЛМА, передаваемой по радиоканалу с борта ЛМА в НКУ. Примерный вид отображаемой информации на мониторе НКУ приведен на рис. 4.

Летательный микроаппарат (ЛМА) состоит из несущей конструкции, системы управления движением и навигации (СУД и Н), двигательной установки, аккумуляторной батареи и видеокамеры с передатчиком видеоизображения. Важным моментом при проектировании летательного микроаппарата является выбор рациональной конструкции. Как показали исследования, полет ЛМА происходит при числах Рейнольдса 10 000–100 000. Коэффициент лобового сопротивления существенно зависит от формы тела. Наименьшим коэффициентом лобового сопротивления обладает осе симметричное каплеобразное тело, у которого тупой нос и заостренная задняя часть. При обтекании этого тела поток хорошо смыкается позади него, препятствуя тем самым падению давления за корпусом. При правильном выборе формы ЛМА можно достичь значения коэффициента лобового сопротивления менее 0,4. Для того чтобы минимизировать силу лобового сопротивления, необходимо проектировать аппарат таким образом, чтобы коэффициент лобового сопротивления, площадь лобового сопротивления и скорость обтекания были минимальны.

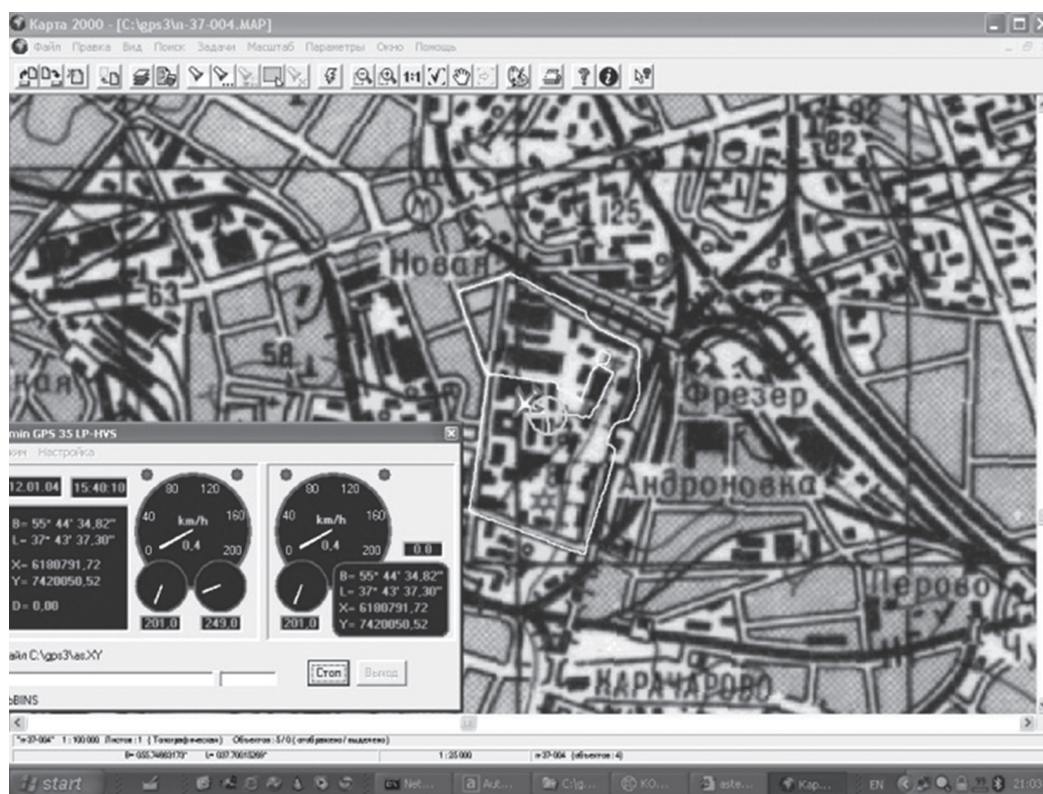


Рис. 4. Вид отображаемой информации на мониторе НКУ

Как показали расчеты [2, 3], для обеспечения скорости полета ЛМА 20 м/с площадь лобового сечения не должна превышать 50 см<sup>2</sup>. Вторым важным моментом при проектировании конструкции ЛМА является правильный выбор собственных частот автомата стабилизации, корпуса, электродвигателя и редуктора с винтами. Это связано с тем, что моменты инерции винтов с ротором электродвигателя соизмеримы с моментами инерции двигателя и суммарные моменты инерции ЛМА будут переменными пропорционально частоте вращения винтов. В этом случае уравнения движения летательного аппарата будут не только нелинейными с перекрестными связями, но и с переменными параметрами, что резко усложняет задачу синтеза автомата стабилизации. Исходя из этого, собственная частота автомата стабилизации должна быть существенно меньше собственной частоты ЛМА, а частота вращения винтов существенно выше. На рис. 5 приведена фотография конструкции четырехвинтового ЛМА во время полета в помещении. В состав ЛМА с четырьмя электродвигателями входят несущая конструкция, СУД и Н, электродвигатели с редукторами и винтами, аккумуляторная ба-

тарей и видеокамера. Несущая конструкция ЛМА строится на основе креста-соединителя, в котором выполнены четыре отверстия для крепления несущих балок, на концах которых закреплены электродвигатели с редукторами и винтами (пропеллерами). Усилители мощности располагаются над крестом-соединителем, а СУД и Н, аккумуляторная батарея и видеокамера – снизу.



Рис. 5. Фотография конструкции четырехвинтового ЛМА

Для данной конструкции ЛМА были проведены расчеты угловых и линейных частот конструкции аппарата и проведены экспериментальные исследования собственных частот конструкции ЛМА. Расчеты и измерения показали, что собственные частоты конструкции от 10 Гц и выше определяются и колебаниями винтов с шестеренкой из-за

угловой податливости узла подшипника. Частоты от 20 до 28 Гц вызываются изгибными деформациями винтов, а частоты от 40 и выше дебалансом ротора электродвигателей и изгибом балок конструкции. Частотный анализ ускорений показал, что имеется низкочастотный шум с дискретностью пиков 0,2 Гц с перегрузкой 0,01 g и на двигателе в вертикальном направлении с дискретностью пиков перегрузки 2 Гц и амплитудой 0,2 g. Для уменьшения амплитуд вибрации из-за работы двигателя был просчитан вариант малогабаритной конструкции ЛМА с 4-лопастными винтами меньшего диаметра, который позволил увеличить собственную частоту корпуса аппарата до 90 Гц, а частоту винтов выше 35 Гц.

В состав СУД и Н входят: спутниковая навигационная система, магнитный электронный комплекс, бесплатформенный инерциальный блок на основе микромеханических гироскопов и акселерометров, датчик воздушной скорости, барометрический высотомер, доплеровский измеритель скорости, ультразвуковой измеритель малых высот, микропроцессор СУД и Н, бортовая приемно-передающая аппаратура, флеш-память, блок усилителей мощности, рулевые машинки и двигательная установка. На рис. 6. приведена блок-схема аппаратного состава СУД и Н ЛМА.

Анализ конструкции ЛМА показал, что для обеспечения устойчивой работы автопилота необходимо, чтобы собственная частота конструкции аппарата была существенно больше собственной частоты автопилота и значительно меньше собственных частот вращения двигателей и пропеллеров. При этом собственная частота автопилота выбирается исходя из требуемой ошибки стабилизации ЛМА в процессе полета.

Алгоритм управления ЛМА

$$U = W + Pq + B \cdot 1,$$

где  $U$  – матрица-столбец выходных переменных цифрового регулятора – управляющих напряжений двигателей;

$W$  – опорные напряжения управляющих напряжений, обеспечивающих вертикальный подъем ЛМА;

$B, P$  – матрицы коэффициентов регулятора;

$q$  – матрица-столбец вектора углового состояния ЛМА;

$1$  – матрица-столбец вектора линейного состояния ЛМА.

Телекамера должна обеспечивать телевизионную съемку земной поверхности с высоты 150 метров над поверхностью земли с максимально возможным разрешением в кадре около  $50 \times 50$  м. При этом вес камеры должен быть минимальным.

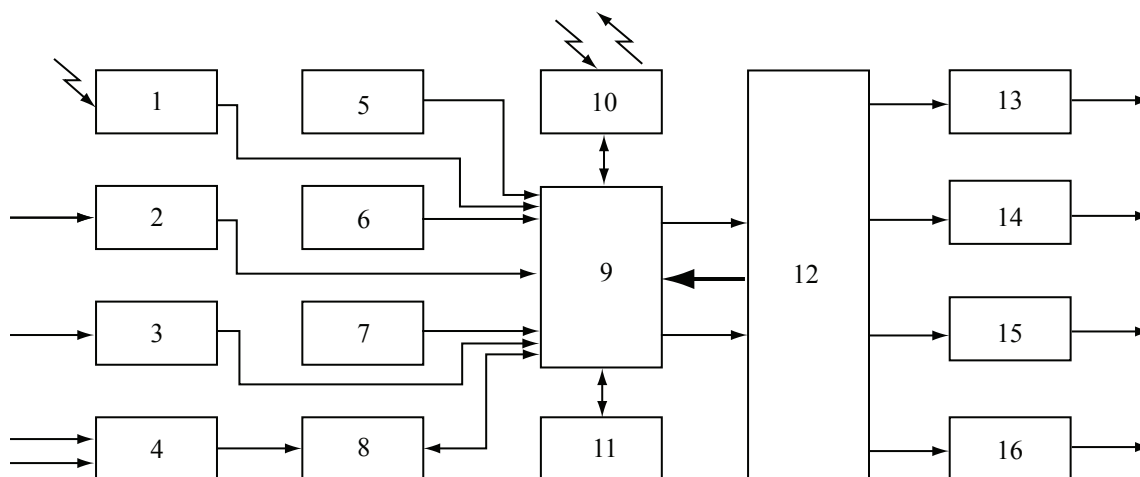


Рис. 6. Блок-схема аппаратного состава СУД и Н: 1 – спутниковая навигационная система, 2 – бесплатформенный инерциальный блок (БИБ), 3 – магнитный компас, 4 – баровысотометр, 5 – система определения скорости и направления ветра, 6 – ультразвуковой измеритель малых высот, 7 – ультразвуковой измеритель малых дальностей, 8 – устройство сопряжения, 9 – микроконтроллер, 10 – бортовое приемно-передающее устройство, 11 – флеш-память, 12 – блок усилителей мощности, 13–16 – электрические двигатели



Полный угол обзора видеокамеры вычисляется по формуле

$$\alpha_o = 2\arctan(l_M / 2f_o),$$

где,  $l_M$  – размер ПЗС матрицы (мм);  
 $f_o$  – фокусное расстояние (мм).

Минимально разрешаемый угол видеокамеры, т.е. угловое разрешение видеокамеры, зависит от количества телевизионных линий в матрице и вычисляется по следующей формуле

$$\Delta\alpha_o = 2\arctan(l_M / 2f_o) / N_{\text{твл}},$$

где  $N_{\text{твл}}$  – число телевизионных линий.

Для устранения смаза изображения погрешность по угловой скорости стабилизации не должна превышать соответственно

$$\omega_a = \Delta\alpha / T,$$

где  $T < 1/24$  с – время фиксирования изображения человеческим глазом.

Для данной телекамеры разрешающая способность по углу равна

$$\Delta\alpha = 37,6 / N_{\text{твл}} = 37,6 / 560 = 0,064^\circ.$$

Соответственно угловая скорость стабилизации не должна превышать

$$\omega_a < 0,064 / (1/24) = 1,53 \text{ град./с.}$$

Структурная схема алгоритмов бортовой СУД и Н приведена на рис. 7. При этом алгоритмы СУД и Н ЛМА делятся по задачам: алгоритм решения навигационной задачи, алгоритмы управления ЛМА и алгоритмы обмена с наземным комплексом управления и типу: вычислительные алгоритмы и аппаратные алгоритмы [6, 9].

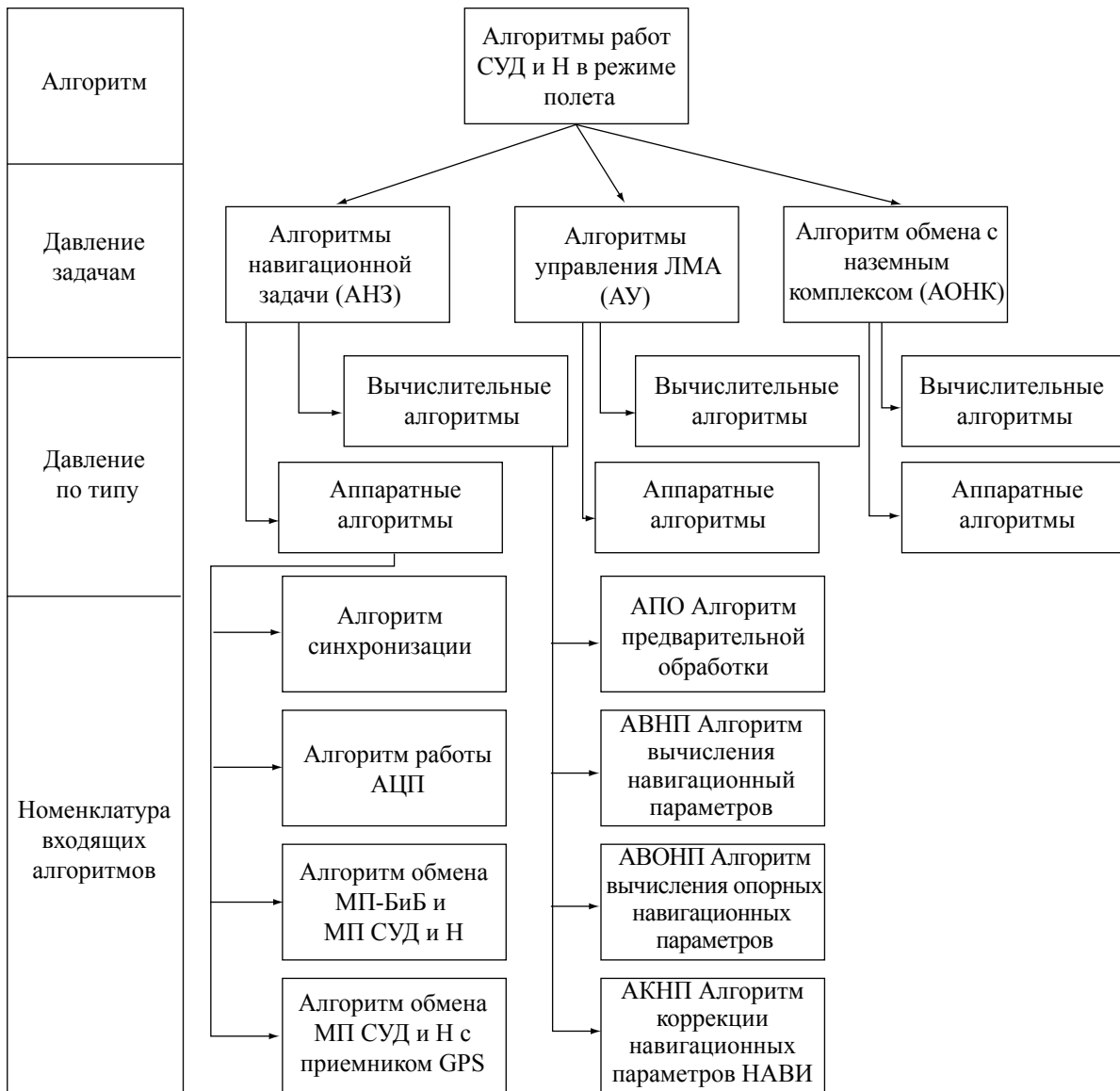


Рис. 7. Структурная схема алгоритмов бортовой СУД и Н

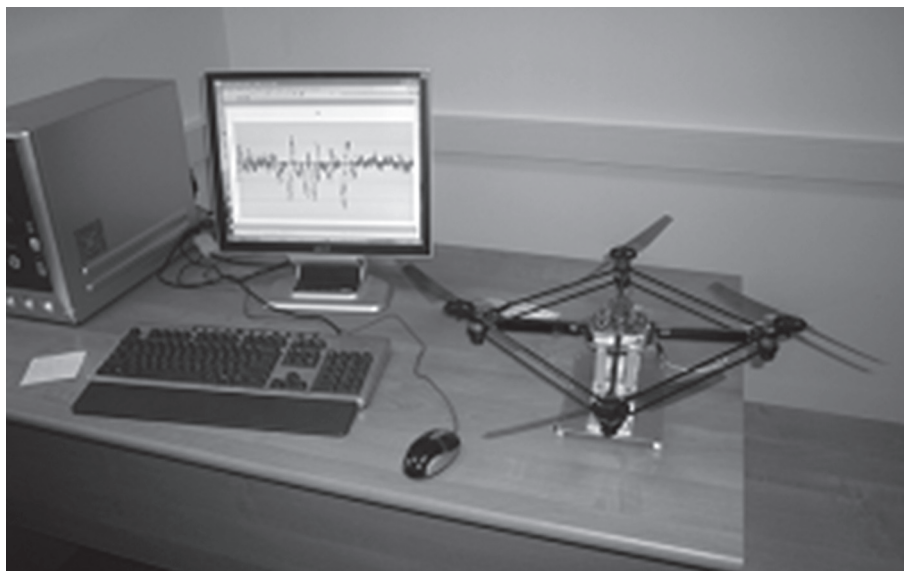


Рис. 8. Стенд для отработки СУД и Н

Автоматизированное рабочее место для отработки системы управления движением и навигации приведено на рис. 8 и содержит персональный компьютер, ступель, программно-математическое обеспечение и предназначено для статической и динамической балансировки ЛМА и определения моментов инерции и коэффициентов демпфирования по периоду и амплитуде свободных колебаний ЛМА [4, 5].

Методика определения собственных частот и относительных коэффициентов демпфирования заключалась в следующем. ЛМА устанавливался на «ножи» ступеля, по соответствующей оси задавалось начальное угловое отклонение и по сигналам гироскопов измерялась угловая скорость с тактом 0,01 с до окончания переходных процессов. По результатам измерений строились переходные процессы в зависимости от времени и определялись период свободных колебаний и амплитуды колебаний. По полученным периодам и амплитудам вычислялись собственные частоты колебаний ЛМА и относительные коэффициенты демпфирования. Проведенные измерения в составе рабочего места показали, что собственные частоты по осям стабилизации ЛМА близки к расчетным и позволили определить коэффициенты демпфирования аппарата. Включение двигателей не приводило к резкому увеличению присоединенных моментов инерции и коэффициентов демпфирования. Анализ переходных характеристик двигателей

показал, что постоянные времени двигателей имеют большой разброс от 0,1 до 0,2 с, что требует отбора двигателей для каждого ЛМА.

Полет ЛМА происходит при погодных условиях, которые характеризуются комплексом различных явлений и параметров состояния атмосферы и которые существенным образом определяют возможность эффективного применения ЛМА. Наиболее характерной особенностью потока воздуха в приземном слое является его турбулентная составляющая. Ветер у поверхности земли почти всегда имеет турбулентный характер. Климатические данные не содержат информации о более коротких пульсациях ветра, чем время осреднения  $T$ . Эти более быстрые турбулентные пульсации, однако, вносят вклад в динамическую составляющую ветровой нагрузки и, следовательно, должны учитываться при расчетах. Мгновенная скорость ветра может быть записана как сумма среднего значения и отклонения от среднего

$$V = \bar{V} + V'; V'^2 = V^2 - \bar{V}^2 = \sigma_v^2.$$

Период осреднения для среднего значения  $\bar{V}$  в зависимости от конкретной задачи может любым отрезком времени. При выбранном времени осреднения  $V_T$  представляет более высокочастотные изменения. Для решения прикладных задач среднее значение берется по климатическим данным. Значения же  $V_T$  предлагается определять по частотному спектру модуля скорости ветра  $S_v(n)$  или путем экспериментальных измерений не-

обходимых характеристик турбулентности. Энергия, заключенная между частотами  $n_1$  и  $n_2$ , составляет

$$\sigma_v^2 = \int_n^{n_2} S(n) dn.$$

Сложный характер атмосферных явлений предопределяет необходимость представления ветровых нагрузок в виде случайных воздействий. Распространенным способом задания случайных нестационарных возмущений при исследовании устойчивости ЛА является каноническое разложение по координатным функциям [13]. В частности, зависимость горизонтальной составляющей скорости ветра  $V_{\text{врт}}$  от высоты  $h$  представляется таким способом в виде

$$\begin{aligned} V_{\text{врт}}(h) &= V_{\text{врт}}(h) + \sum V_i \varphi_i, \\ m_{vij} &= \{1(i=j), 0(i \neq j)\}, \\ D(V_{\text{врт}}(h)) &= \sum \varphi_i^2(h), \end{aligned}$$

где  $V_{\text{врт}}$  – систематическая составляющая горизонтальной составляющей ветра;

$V_i$  – случайные независимые коэффициенты с единичной дисперсией;

$\varphi_i(h)$  – детерминированные координатные функции, выбираемые таким образом, чтобы дисперсия скорости ветра совпадала с реальной дисперсией горизонтальной составляющей ветра.

Такое представление скорости ветра позволяет проводить исследование параметров движения ЛМА путем математического статистического моделирования, используя датчик случайных чисел для реализации  $V_i$ .

Статистическая модель проекций вектора скорости, учитывающая широтные и временные поправки, в форме канонического разложения по координатным функциям имеет вид [12]

$$\begin{aligned} V_w(\varphi, \lambda, h, t) &= m_w(\varphi, \lambda, h, t) + \\ &+ K_\varphi(\varphi) K_T(t) \sum Y_i X_{wi}(h) \end{aligned}$$

где  $i = 1 \dots N_w$ ;

$y_i$  – случайные числа, распределенные по нормальному закону  $N(0, 1)$ ;

$m_w(\varphi, \lambda, h, t)$  – средняя величина скорости ветра в зависимости от широты  $\varphi$ ; долготы  $\lambda$ , высоты  $h$  и времени  $t$ ;

$K_\varphi(\varphi) K_T(t)$  – широтные и временные поправки;

$X_{wi}(h)$  – координатные функции канонического разложения.

Анализ экспериментальных записей продольной и вертикальной компонент ветра, полученных на разных уровнях мачты высотой 300 м [11], показал, что хорошая аппроксимация может быть достигнута решением дифференциального уравнения 1-го порядка

$$k \cdot \dot{u} = -u + |w|,$$

где  $k$  – постоянная времени ветрового потока;

$u$  – скорость ветра;

$|w|$  – случайная составляющая, распределенная по нормальному закону с заданными математическим ожиданием и дисперсией ветра.

Постоянная времени потока ветра позволяет учитывать инерционность и порывистость потока. На основе данного закона может моделироваться как сила ветра, так и его направление.

Моделирование системы управления движением и навигации проводилось для различных траекторий движения ЛМА, центры масс и давления которого совпадают в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Основной целью математического моделирования является исследование на основе полученных алгоритмов автономного управления динамических параметров движения ЛМА при воздействии в контуре управления целого ряда возмущений, к основным из которых относятся:

- статистические погрешности измерительной системы, включающей инерциальные датчики и датчики внешней информации;

- статистические ветровые возмущения;

- статистические возмущения, определяемые недостаточной жесткостью конструкции ЛМА;

- статистические возмущения, определяемые разбросом ряда конструктивных и динамических параметров ЛМА и его элементов, в частности динамических параметров электродвигателей, аэродинамических характеристик ЛМА.

С целью исследования влияния указанных факторов в контуре управления на динамические характеристики движения ЛМА разработан вычислительный комплекс на базе программной среды *MatLab + Simulink*.

Угловое движение ЛМА может быть представлено следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} J_x \cdot \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \cdot \omega_y \cdot \omega_z &= M_x; \\ J_y \cdot \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \cdot \omega_x \cdot \omega_z &= M_y; \\ J_z \cdot \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \cdot \omega_x \cdot \omega_y &= M_z; \\ M_x &= -k_{dx} \cdot \omega_x + T_2 \cdot L_2 - T_4 \cdot L_4 - N_{ya} \cdot \Delta z_{цд} + \\ &+ N_{za} \cdot \Delta y_{цд} - N_{yT} \cdot \Delta z_{цм} + N_{zT} \cdot \Delta y_{цм}; \\ M_y &= -k_{dy} \cdot \omega_y + k_{r1} \cdot T_1 - k_{r2} \cdot T_2 + k_{r3} \cdot T_3 - k_{r4} \cdot T_4 + \\ &+ N_{ya} \cdot \Delta z_{цд} - N_{za} \cdot \Delta x_{цд} + N_{yT} \cdot \Delta z_{цм} + N_{zT} \cdot \Delta x_{цм}; \\ M_z &= -k_{dz} \cdot \omega_z - T_1 \cdot L_1 + T_3 \cdot L_3 + N_{ya} \cdot \Delta x_{цд} - \\ &- N_{xa} \cdot \Delta y_{цд} - N_{xT} \cdot \Delta y_{цм} + N_{yT} \cdot \Delta x_{цм}; \\ \dot{\vartheta} &= \omega_x \cdot \cos \vartheta - \omega_y \cdot \sin \vartheta; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x \cdot \cos \vartheta + \omega_y \cdot \sin \vartheta; \\ \dot{\psi} &= 1/\cos \vartheta \cdot (\omega_y \cdot \cos \vartheta - \omega_x \cdot \sin \vartheta); \\ \dot{T}_i &= -\frac{1}{\tau_i} \cdot T_i + \frac{k_{ui}}{\tau_i} \cdot U_i \quad (i=1...4), \end{aligned}$$

где  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  и  $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – проекции угловых скоростей и угловых ускорений ЛМА в связанной системе координат;

$M [M_x, M_y, M_z]$  – вектор суммарного момента от действия управляющих и возмущающих сил;

$J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции ЛМА;

$L_1, L_2, L_3, L_4$  – конструктивные размеры (плечи), определяющие положение электродвигателей относительно строительного центра ЛМА;

$T_i$  – тяги каждого из 4-х электродвигателей;

$\tau_i$  – постоянные времени электродвигателей;

$k_{ui}$  – передаточные коэффициенты по напряжению электродвигателей;

$k_{r1}, k_{r2}, k_{r3}, k_{r4}$  – коэффициенты, определяющие величины реактивного момента электродвигателей;

$k_{dx}, k_{dy}, k_{dz}$  – коэффициенты демпфирования;

$\Delta x_{ц.м.}, \Delta y_{ц.м.}, \Delta z_{ц.м.}, \Delta x_{ц.д.}, \Delta y_{ц.д.}, \Delta z_{ц.д.}$  – смещения центра масс и центра давления соответственно относительно центра строительной системы координат.

Линейное движение ЛМА относительно системы координат  $x_0, y_0, z_0$  может быть представлено векторным уравнением

$$m \cdot \vec{V}_c = \vec{F} + \vec{P},$$

где  $m$  – масса ЛМА;

$\vec{V}_c$  – вектор ускорения;

$\vec{F}$  – главный вектор всех активных сил, приложенных к ЛМА;

$\vec{P}$  – сила земного тяготения (ускорение силы тяготения принято в рассматриваемой задаче постоянным  $\approx 9,81$  м/с<sup>2</sup>).

Главный вектор активных сил определяется векторами суммарной силы тяги винтовых электродвигателей  $\vec{N}_T$  и аэродинамической силы  $\vec{N}_a$  и может быть представлен в виде

$$\vec{F} = A \cdot (\vec{N}_a + \vec{N}_T);$$

$$\vec{N}_T = \begin{bmatrix} N_{xT} \\ N_{yT} \\ N_{zT} \end{bmatrix}, \vec{N}_a = \begin{bmatrix} N_{xa} \\ N_{ya} \\ N_{za} \end{bmatrix}.$$

Составляющие векторов суммарной тяги электродвигателей и аэродинамической силы, соответственно в связанной и поточной системах координат, определяются следующим образом:

$$N_{xa} = -C_x \times S_x \times \rho \times V \times V/2;$$

$$N_{ya} = -C_y \times S_y \times \rho \times V \times V/2;$$

$$N_{za} = -C_z \times S_z \times \rho \times V \times V/2;$$

$$N_{xT} = 0;$$

$$N_{yT} = \sum_{i=1}^4 T_i;$$

$$N_{zT} = 0;$$

$$V = \sqrt{(V_{xc} + V_{wx})^2 + (V_{yc} + V_{wy})^2 + (V_{zc} + V_{wz})^2},$$

где  $v_{xi}, v_{zi}$  – угловые эксцентриситеты векторов тяги  $T_i$  двигателей;

$\rho$  – плотность воздушной среды;

$C_x, C_y, C_z$  и  $S_x, S_y, S_z$  – безразмерные аэродинамические коэффициенты и площади аэродинамических сечений по соответствующим осям;

$V_{xc}, V_{yc}, V_{zc}, V_{wx}, V_{wy}, V_{wz}$  – проекции скоростей объекта ( $V_c$ ) и ветра ( $V_{wz}$ ) в начальной стартовой системе координат,

$A$  – транспонированная матрица перехода от связанной к начальной стартовой системе координат, определяемая углами тангажа, рысканья и крена  $\vartheta, \psi, \gamma$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cdot \cos \psi - \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \gamma & \sin \vartheta \cdot \cos \psi + \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \gamma & -\sin \psi \cdot \sin \gamma \\ -\sin \vartheta \cdot \cos \gamma & \cos \vartheta \cdot \cos \gamma & \sin \gamma \\ \cos \vartheta \cdot \sin \psi + \sin \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \gamma & \sin \vartheta \cdot \sin \psi - \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \gamma & \cos \gamma \cdot \cos \psi \end{bmatrix}$$



Математическое моделирование проводилось для случаев реализации следующих основных режимов управления ЛМА. Управление с использованием непрерывных сигналов измерений БИБ, бортового высотомера и GPS-приемника, формируемых с дискретностью 1с. При этом текущее управление движением ЛМА осуществляется на основе сигналов управления, вычисленных микроконтроллером на предыдущем шаге выдачи сигналов GPS-приемника.

Исследование динамических характеристик контура управления осуществлялось для базовых значений конструктивных и динамических параметров ЛМА для высот «зависания» и полета 50 м в вариантах точных датчиков внешней информации и датчиков со среднеквадратическими погрешностями измерений на уровне 5 м по координатам и 0,035 м/с по проекциям скоростей для GPS-приемника, 1 м для бортового высотомера и со среднеквадратической погрешностью определения вертикальной скорости на уровне 0,035 м/с.

На рис. 9 представлен график изменений координат аппарата в вертикальной плоскости (ОХУ). Масса аппарата 600 г. Номинальная тяга каждого из двигателей 1,15 Н, а максимальная тяга – 1,5 Н. Центры масс и давления совпадают, и геометрические центры установки двигателей соответствуют заданным расчетным значениям. Коррекция БИНС осуществляется по сигналам GPS. Маршрут заданного движения аппарата:  $t=0$ ,  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ ;  $t=30$  с,  $x=10$ ,  $y=25$ ,  $z=0$ ;  $t=60$  с,  $x=10$ ,  $y=50$ ,  $z=0$ ;  $t=70$  с,  $x=10$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ .

Как видно из графика, погрешности по координатам достигают значительных величин из-за методических погрешностей и перекрестных связей в СУД и Н. В целом исследование динамических характеристик экспериментального ЛМА, проведенное путем математического моделирования контура управления ЛМА с использованием статистических характеристик погрешностей реальных инерциальных датчиков (0,12 град./с и 0,025 м/с<sup>2</sup>) и расчетных конструктивных и динамических параметров экспериментального ЛМА, показало, что приемлемое качество и точность ( $\pm 30$  м) регулирования параметров движения ЛМА может быть достигнуто на высотах полета до 150 м.

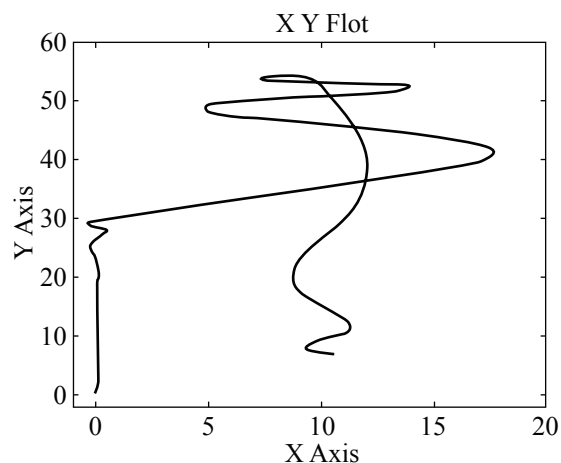


Рис. 9. Траектория движения ЛМА по результатам моделирования в режиме взлета и посадки

Программа лабораторных испытаний включала отработку алгоритмов работы системы управления движением в режимах трехосной стабилизации, взлета и мягкой посадки, зависания и полета по прямой линии [10].

Погрешность по каналам тангажа и крена в режиме зависания и трехосной стабилизации при импульсном воздействии не превышала 30 угл. мин.

Реальный режим взлета и посадки на малых высотах проводился в помещении. Маршрут заданного движения ЛМА представлял подъем на высоту 0,4 м и полет по линии на 3 м и посадку. Погрешность гироскопов 0,12 град./с, акселерометров 0,025 м/с<sup>2</sup>, ультразвукового измерителя высоты 0,012 м.

Анализ результатов исследований СУД и Н ЛМА позволяет сделать следующие выводы:

- разработанные алгоритмы и программно-математическое обеспечение позволяют обеспечить работоспособность ЛМА при полетах на открытой местности и в помещениях;

- погрешность управления ЛМА в режиме зависания составила 0,5 град, а в режиме горизонтального полета в помещении 0,4 м.

Анализ результатов комплексных наземных испытаний мобильного комплекса управления совместно с бортовым блоком аппаратуры СУД и Н ЛМА показал безотказную работу аппаратуры в соответствии с алгоритмами и программно-математическим обеспечением НКУ и СУ ЛМА. Канал пере-

дачи видеоизображения работал безотказно на всем протяжении трассы. Погрешности определения местоположения при испытаниях навигационных систем в составе наземных транспортных средств составили не более 30 м (18).

### Библиографический список

1. Ачильдиев, В.М. Дистанционно пилотируемый микролетательный аппарат для локального мониторинга лесных и урбосистем / В.М. Ачильдиев, Н.М. Иванов, В.А. Есаков и др. // Научн. тр. международной научно-технической конференции «Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды». – М.: МГУЛ, 2001. – С. 290–294.
2. Абрамов, С.В. Мобильный комплекс для локального мониторинга урбозкосистем на основе микролетательного аппарата / С.В. Абрамов, В.М. Ачильдиев, О.А. Мезенцев. – М.: МСТ, 2002. – № 10. – С. 21–25.
3. Ачильдиев, В.М., Абрамов, С.В., Воробушкин, В.В. и др. Портативный комплекс авианаблюдений и автономно пилотируемый летательный микроаппарат для него. Патент РФ № 2232104, 2003.
4. Ачильдиев, В.М., Терешкин, А.И., Юров, В.Ю и другие. Универсальный навигационный прибор управления движением на основе микромеханических чувствительных элементов и унифицированная бесплатформенная инерциальная навигационная система для этого прибора. Патент РФ № 2263283, 2004.
5. Ачильдиев В.М., Мезенцев А.П., Наумов А.Н. и др. Способ комплексных испытаний летательного микроаппарата с интегральной бесплатформенной инерциальной навигационной системой и устройства для его осуществления. Патент РФ № 2263283, 2004.
6. Мезенцев, А.П. Интегрированные навигационные системы для мобильных комплексов локального мониторинга урбозкосистем на основе автономно пилотируемых летательных микроаппаратов / А.П. Мезенцев, В.М. Ачильдиев, С.В. Абрамов // Сборник докладов X Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2003. – С. 22–24.
7. Ачильдиев, В.М., Вишневский В.М., Терещенко Б.Н. и другие. Телекоммутиационная воздушная платформа для беспроводных сетей для передачи информации. Патент РФ на полезную модель № 52296, 2006.
8. Ачильдиев, В.М., Вишневский В.М., Терещенко Б.Н. и другие. Method for foming regional wireless informanion transmission networks and a teleswitching air – borne platfom for carring out said method. PCT WO 2007/043908A1.
9. Ачильдиев, В.М. Бесплатформенные инерциальные блоки на основе микромеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения: монография / В.М. Ачильдиев. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 223 с.
10. Мезенцев, А.П. Результаты лабораторных испытаний летательного микроаппарата с интегрированной системой управления / А.П. Мезенцев, В.М. Ачильдиев и др. // Сборник докладов X Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2007.
11. Метрологический режим нижнего трехсотметрового слоя атмосферы. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – С. 81.
12. Колозезный, Э.А. Системы управления средств выведения космических аппаратов и их сертификация / Э.А. Колозезный, С.М. Вязов, В.М. Ачильдиев и др. – М.: МГУЛ, 2002.

## СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Н.А. БЕДРО, инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»

*glmnems@geo-nv.ru*

В последнее время возрастает интерес к системам позиционирования, чувствительными элементами которых являются микромеханические гироскопы и акселерометры. Очевидными преимуществами подобных систем являются относительно невысокая стоимость, малые габаритно-массовые размеры и низкое энергопотребление [1,2].

Существенным недостатком подобных систем является относительно невысо-

кая точность измерения параметров, а также существенная зависимость этой точности от изменения температуры и нестабильности напряжения питания чувствительных элементов. Существуют алгоритмы компенсации погрешностей, позволяющие на основании постоянно измеряемой температуры и напряжения питания вносить поправки в значения, измеряемые микроакселерометрами ускорений [3]. Определение коэффициен-

тов чувствительности для этих алгоритмов и калибровка точностных параметров осуществляются в процессе сертификации [4].

Согласно существующей практике сертификация систем позиционирования в процессе изготовления предполагает прохождение следующих испытаний:

- калибровка точностных параметров;
- определение коэффициентов чувствительности к значимым возмущающим факторам (температура, напряжение питания и др.);

- ресурсные;
- температурно-влажностные;
- вибрационные;
- ударные;
- точностные.

Испытания на воздействие вибрационных и ударных нагрузок проводятся с помощью различных виброударных стендов, в то время как для точностных параметров и для проведения ресурсных испытаний используются вращательные стенды. В настоящей статье рассматривается возможность совмещения всех видов испытаний с использованием одного лишь вращательного стенда АС 1120S V2.3 [5]. Используя известные соотношения между угловой скоростью, линейным, тангенциальным и угловым ускорениями, приводится математическое обоснование возможности обеспечения воздействия на чувствительный элемент линейного ускорения как постоянного, так и периодического (вибрация), при расположении системы позиционирования таким образом, чтобы ось чувствительного элемента располагалась ортогонально оси вращения стенда. Такой подход позволяет сократить количество оборудования при сертификации микромеханических акселерометров и систем позиционирования на их основе.

При нахождении испытуемого прибора на поворотной платформе, вращающейся с угловым ускорением, на него действуют нормальное и тангенциальное ускорения (рис. 1).

Нормальное ускорение пропорционально угловой скорости, а тангенциальное ускорение пропорционально угловому ускорению поворотной платформы

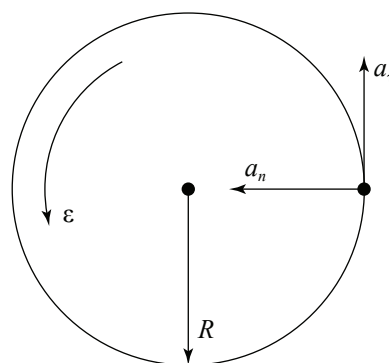


Рис. 1. Воздействие на испытуемый прибор нормально и тангенциального ускорений;  $a_n$  – нормальное ускорение, пропорциональное угловой скорости вращения поворотной платформы;  $a_\tau$  – тангенциальное ускорение, пропорциональное угловому ускорению поворотной платформы;  $\epsilon$  – угловое ускорение поворотной платформы;  $R$  – расстояние от оси вращения до испытуемого прибора

$$a_n = \omega^2 \cdot R, a_\tau = \epsilon \cdot R, \quad (1)$$

где  $a_n$  – нормальное ускорение, пропорциональное угловой скорости вращения поворотной платформы;

$a_\tau$  – тангенциальное ускорение, пропорциональное угловому ускорению поворотной платформы;

$\omega$  – угловая скорость вращения поворотной платформы;

$\epsilon$  – угловое ускорение поворотной платформы;

$R$  – расстояние от оси вращения до испытуемого прибора.

Ускорение как функция времени определяется соотношением

$$a(t) = A \cdot \sin(2\pi v \cdot t),$$

где  $a(t)$  – вибрационное ускорение;

$A$  – амплитуда виброускорения;

$v$  – частота виброускорения.

Согласно соотношению (1), функциональная зависимость углового ускорения от времени приобретает вид

$$\epsilon(t) = E \cdot \sin(2\pi v \cdot t),$$

$$E = A / R,$$

где  $\epsilon(t)$  – угловое ускорение;

$E$  – амплитуда углового ускорения;

$v$  – частота углового ускорения.

Угловая скорость и угол в зависимости от времени

$$\omega(t) = \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau = \Omega \cdot \cos(2\pi v \cdot t);$$

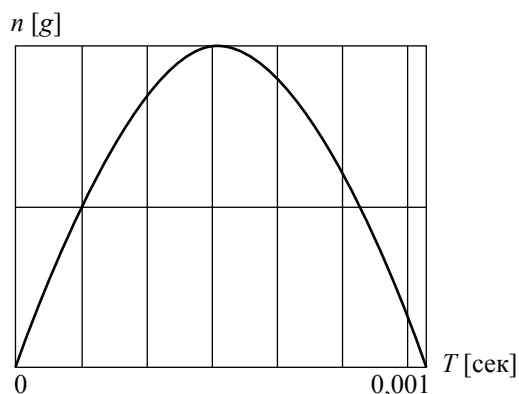


Рис. 2. Модель удара;  $n$  – перегрузка;  $T$  – время

$$\Omega = -\frac{A}{R \times 2\pi v};$$

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \Phi \cdot \sin(2\pi v \cdot t);$$

$$\Phi = -\frac{A}{R \cdot 4\pi^2 v^2}. \quad (3)$$

Модель удара можно представить в виде половины периода синусоиды (рис. 2).

В связи с тем, что проведение испытаний приборов на ресурс, который может достигать сотни тысяч часов, весьма затруднительно из-за технических и экономических факторов, требуется разработка методики ускоренных испытаний.

Ускоренные испытания микромеханических акселерометров и систем позиционирования на их основе позволяют при помощи увеличения одной или нескольких нагрузок на прибор определить реальную интенсивность отказов за относительно короткое время и с использованием малого количества образцов.

При разработке методики ускоренных испытаний необходимо:

- выбрать воздействующие факторы, которые могут быть использованы в качестве форсирующих;
- выбрать уровень форсирующего воздействия, ускоряющего процесс старения, при котором физическая картина старения не меняется;
- найти функциональную зависимость между показателями надежности в нормальном и форсированном режимах;
- установить параметры и критерии годности опытных образцов микромеханических акселерометров;

– разработать программу ускоренных испытаний микромеханических акселерометров, определяющую объем испытаний и сочетание уровней воздействующих факторов.

Для микромеханических акселерометров, которые, как правило, находятся в герметичном корпусе, применение в качестве форсирующих факторов увеличения влажности и давления нецелесообразно, так как они не соответствуют реальным условиям эксплуатации.

В соответствии с [6, 7] рекомендовано в качестве ускоряющих факторов использовать температуру и напряжение.

Увеличение напряжения питания и плотности тока может привести к изменению физики отказов по причине возникновения нелинейных эффектов, связанных с возрастанием напряженности поля, критичным для малых толщин изоляции и зазоров между электродами.

Так как скорость протекания процессов деградации значительно зависит от температуры, наиболее приемлемым ускоряющим фактором является повышенная температура испытаний [7].

Предельно допустимую температуру ускоренных испытаний, согласно ОСТ 92–9509–81, можно определить по формуле [6]

$$T_{\text{фи}} = T_{\text{пред}} - T_{\text{перегр}}$$

где  $T_{\text{фи}}$  – температура форсированных испытаний;

$T_{\text{перегр}}$  – температура перегрева ММА и ММГ;

$T_{\text{пред}}$  – предельно допустимая температура чувствительного элемента по ТУ.

Температура перегрева соединения при его сопротивлении  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  Ом и максимальном токе питания 0,2 А не должна превышать  $10^\circ\text{C}$ . Отклонения температуры при климатических испытаниях могут составлять от  $t_{\text{мин}}$  до  $t_{\text{макс}}$ . Таким образом, предельно допустимая температура испытаний составит

$$T_{\text{пред}} = |t_{\text{мин}}| + |t_{\text{макс}}|.$$

Для испытаний макетов в корпусном исполнении предельно допустимая в настоящее время температура испытаний составит  $125^\circ\text{C}$ , так как максимальная температура, при которой работоспособны микросхемы ОС, составляет  $125^\circ\text{C}$ . Таким образом, предельно допустимая температура испытаний



для микромеханических акселерометров составляет 125°C.

В качестве универсальной модели теплового старения для изделий электронной техники пользуются зависимостью Аррениуса, которую в общем виде можно выразить уравнением

$$\text{Ln}(t) = A \cdot T_{\text{фи}}^{-1} + B,$$

где  $t$  – время испытаний, за которое нарушается нормальная работа чувствительного элемента;

$T_{\text{фи}}$  – температура форсированных испытаний;

$A, B$  – константы.

Построив график этой зависимости по нескольким точкам для различных температур испытаний (рис. 3) и проведя экстраполяцию ее в области температур эксплуатации  $T_3$ , можно определить ресурс их непрерывной работы:

$t_1$  – время наработки на отказ при температуре  $T_1$ ;

$t_2$  – время наработки на отказ при температуре  $T_2$ ;

$t_3$  – прогнозируемое время наработки на отказ при температуре эксплуатации  $T_3$ .

В качестве параметров-критериев годности микромеханических акселерометров выберем, например, точностные характеристики.

Для проведения испытаний должны быть использованы опытные образцы.

Перед постановкой на испытания микромеханические акселерометры должны быть проверены на соответствие требованиям нормативно-технической документации, действующей на предприятии. Микромеханические акселерометры подвергаются испытаниям до наработки на отказ при различных температурах: от  $-t_{\text{min}}$  до  $+t_{\text{max}}$ .

Затем строится зависимость  $\text{Ln}(t) = A \cdot T^{-1} + B$  и определяется время наработки на отказ (для образцов без нагрузки).

Параметры-критерии годности микромеханических акселерометров в ходе испытаний нужно контролировать. Если параметры имеют устойчивый временной дрейф, то на основе полученных зависимостей можно спрогнозировать время отказа микромеханических акселерометров при определенной температуре испытаний.

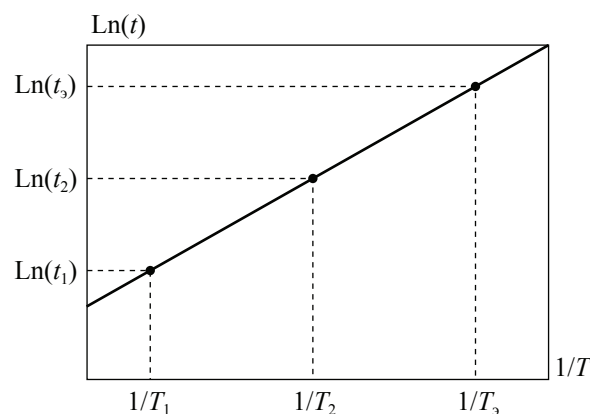


Рис. 3. Зависимость логарифма времени испытаний от температуры форсированных испытаний;  $T$  – температура;  $t$  – время

Построив в дальнейшем график зависимости времени отказа микромеханических акселерометров от температуры испытаний согласно [3] и рассчитав коэффициенты  $A$  и  $B$ , можно будет определить срок сохраняемости и время наработки на отказ микромеханических акселерометров.

При обработке результатов измерений методом наименьших квадратов коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из выражений

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2};$$

$$B = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2},$$

где  $y_i = \text{Ln} \cdot t_i$ ;  $x_i = (T^{-1})_i$ ;

$i = 1, 2, 3 \dots n$  – число точек измерения температуры.

Стандартом устанавливается шесть режимов форсирования: 75°C, 125°C, 150°C, 200°C, 300°C и 400°C, а продолжительность испытаний определяется по диаграмме, представленной на рис. 4.

В связи с особенностями используемого оборудования, наиболее удобного для длительных испытаний, определяем температуру ускоренных испытаний, равную 75 °С.

Если после проведения форсированных испытаний параметры критерия годности остаются в допустимых по КД пределах, то микромеханические акселерометры считаются выдержавшими испытания.

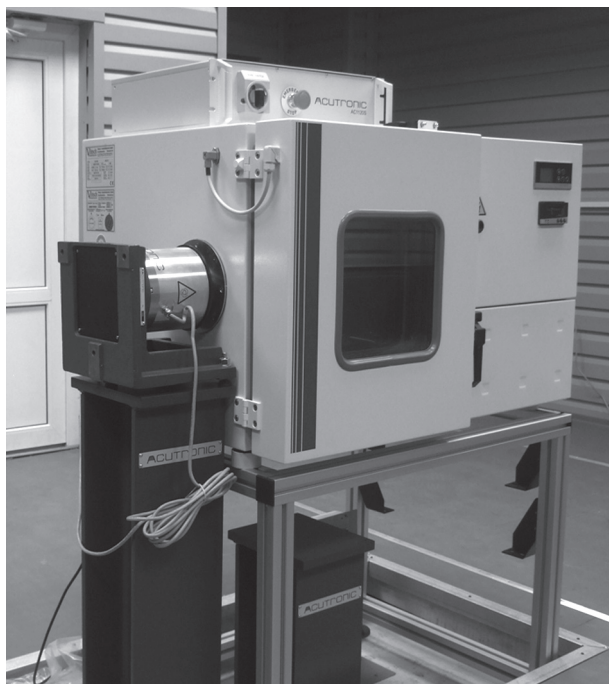


Рис. 4. Фотография автоматизированного комплексного стенда фирмы «Acutronic»

Количество образцов, подвергаемых испытаниям, выбирается в соответствии с ГОСТ 20.57.304–76.

После проведения ускоренных испытаний определяют время появления отказа испытуемых приборов и вычисляют время наработки на отказ по формуле

$$\bar{t}_{\text{но}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{но}i}}{N}; \quad \sigma_{\text{но}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{t}_{\text{но}} - t_{\text{но}i})^2}{N}}$$

где  $t_{\text{но}i}$  – время появления отказа  $i$ -го прибора;

$\bar{t}_{\text{но}}$  – математическое ожидание времени наработки на отказ;

$\sigma_{\text{но}}$  – среднеквадратичное отклонение времени наработки на отказ;

$N$  – количество образцов.

Малые габаритно-массовые характеристики и низкое энергопотребление бесплатформенных инерциальных блоков на основе микромеханических кремниевых чувствительных элементов делает возможным создание универсального испытательного многофункционального стенда, обеспечивающего совмещение различных видов испытаний отмеченных приборов, в том числе при одновременном задании нескольких факторов, влияющих на характеристики испытываемого прибора, то есть создать условия, эквивалентные услови-

ям работы приборов на объектах, одновременно для сокращения времени испытаний.

Фотография автоматизированного комплексного стенда фирмы «Acutronic» приведена на рис. 4.

Использование предлагаемых способов и стенда фирмы «Acutronic» позволяет выполнять следующие типы испытаний:

1. Калибровка точностных параметров микромеханических гироскопов и акселерометров в составе УФСП, в том числе масштабного коэффициента и нулевого сигнала, в температурном диапазоне эксплуатации.

2. Функционирование УФСП, т. е. измерение точностных параметров в диапазоне эксплуатационных температур и влажности.

3. Ускоренные ресурсные испытания.

4. Температурные испытания.

5. Вибрационные испытания.

Таким образом, КИА на основе стенда АС 1120S обеспечивает проведение комплексных испытаний как по калибровке точностных характеристик микромеханических гироскопических чувствительных элементов УФСП, так и ускоренных ресурсных испытаний УФСП в широком температурном, скоростном диапазоне с наложением вибрационных воздействий и линейных перегрузок, что приводит к значительному (на порядок) снижению времени и стоимости проведения испытаний.

Разработанная КИА в сочетании с техническими возможностями комплексного стенда обеспечивает:

– высокую достоверность контроля параметров прибора в соответствии с требованиями технической документации;

– исключение «ручного обсчета» контролируемых параметров и возможности субъективных погрешностей при оценке параметров;

– сокращение в 2–3 раза времени калибровки УФСП предложенной конфигурации в сравнении со временем калибровки УФСП «обычной» конфигурации;

– проведение эксперимента, обработку данных, получение точностных паспортных характеристик прибора согласно методике [5], а также паспортизацию этих параметров.

Таким образом, предлагаемый комплексный измерительный стенд, обеспечиваю-

щий распределение технических возможностей за счет воспроизведения динамических и температурных воздействий, позволяет определить и паспортизировать в автоматическом режиме все составляющие модели погрешностей УФСП и тем самым осуществить в полном объеме его калибровку и испытания.

Малые габаритно-массовые характеристики и низкое энергопотребление УФСП на основе микромеханических кремниевых чувствительных элементов дает возможность проводить групповые испытания и использовать универсальный испытательный многофункциональный стенд, обеспечивающий совмещение различных видов испытаний отмеченных приборов, в том числе при одновременном задании нескольких факторов, влияющих на характеристики испытываемого прибора, то есть создать условия, эквивалентные условиям работы приборов на объектах, а также сократить время испытаний.

#### Заключение

1. Представлено математическое обоснование возможности использования одноосевого вращательного стенда для осуществления всего комплекса точностных, вибрационных и ресурсных испытаний в отличие от существующей практики, когда при подобных испытаниях используются различные вибрационные и вращательные стенды.

2. Разработаны процедура сертификации микромеханических датчиков и бес-

платформенных инерциальных блоков на их основе, методика и алгоритм обработки информации при ресурсных испытаниях, позволяющие сократить время ресурсных испытаний в десятки раз, что дает возможность создать целый ряд новых изделий для народного хозяйства и специального применения.

Работа выполнена по Государственному контракту № 02.523.12.3008 от 8 августа 2007 г.

#### Библиографический список

1. Technishe Daten. Dokument 2 3 101-DB-2-4-D-I S2DXXP06-P07. Gemac mbh. 31.01.2007.
2. Солдатенков, В.А. Микромеханические системы позиционирования на основе микромеханических акселерометров и гироскопов для наשלемых систем целеуказания и индикации / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев и др. // Вестник МГТУ им. Баумана. – 2008. – № 3.
3. Ачильдиев, В.М. Бесплатформенные инерциальные блоки на основе микромеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения / В.М. Ачильдиев. – М.: МГУИ, 2007. – 223 с.
4. Ачильдиев, В.М. Системы управления средств выведения космических аппаратов и их сертификация / В.М. Ачильдиев, С.М. Вязов, Э.А. Колозезный и др. – М.: МГУИ, 2004. – С. 176.
5. Technical Manual AC 1120S. ACUTRONIC ED-70000-1120S.03-2000.
6. Надежность изделий электронной техники, электротехники и квантовой электроники: Справочник. – М.: ВНИИ «Электро-стандарт», 1988. – 324 с.
7. Разработка справочных данных по ускоренной оценке работоспособности и ресурса некоторых типов изделий в космосе / В.И. Ванин и др. – М.: Специальная электроника, 1985. – 224 с.

## МОДАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО МИКРОАППАРАТА

В.В. ВОРОБУШКИН, *главный специалист ФГУП «ЦЭНКИ»*

*vorobushkin@inbox.ru*

В отличие от частотных методов, являющихся традиционными, метод пространства состояний, основанный на использовании матричного исчисления и векторного анализа, позволяет судить, достижима ли цель управления (управляемость объекта), определить необходимый состав измерителей (наблюдаемость объекта), синтезировать управление на

все входы объекта. Метод модального управления (среди различных направлений метода пространства состояний) представляет собой метод формирования цепей обратных связей, придающих замкнутой системе заранее выбранное распределение корней характеристического полинома замкнутой системы (модальный синтез).

В случае если исследуемый объект полностью управляем и все составляющие (тяга двигателей, углы скорости и др.) вектора состояния объекта управления доступны непосредственному измерению (полная информация), то при законе, сформированном в виде линейной функции переменных состояния, корни замкнутой системы можно смещать в любые желаемые положения. Если же подавать управление не на один, а на несколько входов объекта, то эта же задача может быть решена и при использовании в законе управления лишь части переменных состояния (неполная информация).

Случайные ошибки измерения переменных состояния могут исказить качество системы, синтезированной методами модального управления. Эта проблема решается использованием наблюдающих устройств (например фильтров Калмана), которые оценивают переменные состояния при оптимальной фильтрации и сглаживании.

При учете инерционных характеристик электродвигателей в соответствии с уравнениями углового движения четырехвинтового летательного микроаппарата (ЛМА) линейная модель углового движения может быть представлена следующим уравнением [4]

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t),$$

где  $A$  – матрица объекта;

$B$  – матрица управления;

$u$  – входные сигналы;

$x$  – вектор переменных состояний объекта.

Параметрами в данной системе являются  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  проекции угловых скоростей ЛМА в связанной системе координат,  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  – приращения углов,  $T_i$  – тяги двигателей;  $I_x, I_y, I_z$  – моменты инерции ЛМА,  $kT1, kT2, kT3, kT4$  – постоянные двигателей;  $Kr$  – коэффициент реактивного момента двигателей,  $d_i$  – коэффициенты демпфирования.

Условием полной управляемости объекта является равенство ранга его матрицы управляемости  $Q$  порядку  $n$  объекта [1]. Матрица управляемости  $Q$  определяется следующим образом

$$Q = \|B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B\|.$$

Матрица управляемости при  $kdx = kdy = kdz = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ ,  $I_x = I_y = I_z = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$kT1 = kT2 = kT3 = kT4 = 0.05 \text{ 1/сек}$  (рассматриваемый ЛМА представляет собой симметричную конструкцию) имеет ранг, равный порядку рассматриваемой системы  $n = 10$ .

Задача синтеза многомерного регулятора  $u = -P \cdot x$  ( $P = q \cdot p$ ), где  $q$  – матрица столбец,  $p$  – матрица строка, сводится в соответствии с [1] к задаче синтеза одномерного регулятора.

Передаточная функция для эквивалентной одномерной системы

$$W(s) \cdot q = (s \cdot E - A)^{-1} \cdot B \cdot q = g(s)/F(s),$$

где  $E$  – единичная матрица;

$F(s) = \det(s \cdot E - A)$  – характеристический полином, имеющий для рассматриваемой системы вид

$$F(s) = (s + kT1) \cdot (s + kT2) \cdot (s + kT3) \cdot (s + kT4) \times \\ \times (s \cdot I_x + kdx) \cdot (s \cdot I_y + kdy) \cdot (s \cdot I_z + kdz) \cdot s^3,$$

$g(s)$  – матрица-столбец  $n \times 1$  вида:

Учитывая, что

$$g(s) = H(s) - F(s),$$

где  $H(s)$  – характеристический полином замкнутой системы, имеющий для рассматриваемой в качестве примера системы 10-го порядка вид

$$H(s) = (s + a1) \cdot (s + a2) \cdot (s + a3) \cdot (s + a4) \cdot (s + a5) \times \\ \times (s + a6) \cdot (s + a7) \cdot (s + a8) \cdot (s + a9) \cdot (s + a10),$$

может быть определена матрица двумерного регулятора  $P = q \cdot p$ .

Для данной системы 10-го порядка аналитический анализ и представление коэффициентов матрицы регулятора в общем виде затруднительно из-за громоздкости их формульной записи. При размещении корней замкнутой системы в точках

$$s_1 = -kT1, s_2 = -kT2, s_3 = -kT3, s_4 = -kT4,$$

$$s_5 = -kdx/I_x, s_6 = -kdy/I_y, s_7 = -kdz/I_z,$$

$$s_8 = -0,01, s_9 = -0,01 \text{ и } s_{10} = -0,01.$$

Элементы матрицы – строки  $p$  для принятых исходных данных составляют

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = p_7 = 1,$$

$$p_8 = p_9 = p_{10} = (200 - 0,27 \cdot q_1 - 0,13 \cdot q_2 - \\ - 0,33 \cdot q_3 - 0,07 \cdot q_4) / (7 \cdot q_1 - 7 \cdot q_2 + 13 \cdot q_3 - 13 \cdot q_4).$$

Диапазон возможных значений коэффициентов  $q_1, q_2, q_3, q_4$  ограничивается неравенствами

$$7 \cdot q_1 - 7 \cdot q_2 + 13 \cdot q_3 - 13 \cdot q_4 \neq 0,$$

$$200 - 0,27 \cdot q_1 - 0,13 \cdot q_2 - 0,33 \cdot q_3 - 0,07 \cdot q_4 \neq 0.$$

Если число используемых входов и переменных состояния объекта меньше его по-



рядка, то свободное управление становится невозможным.

При использовании микромеханического измерительного блока в составе АП ЛМА непосредственному измерению для рассматриваемой выше системы поддаются только некоторые переменные. В этом случае линейная модель системы может быть представлена уравнениями

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t), y(t) = C \cdot x(t),$$

где

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Матрица наблюдаемости системы

$$Q = \|C^T, A^T \cdot C^T, (A^T)^2 \cdot C^T, \dots, (A^T)^{n-1} \cdot C^T\|$$

для принятых данных имеет ранг 6, который меньше порядка 10 системы, что говорит о неполной наблюдаемости рассматриваемой системы. При этом существенное влияние на данный показатель оказывают постоянные времени двигателей [1].

В условиях неопределенности по целому ряду динамических характеристик ЛМА, исполнительных органов, чувствительных элементов возможна разработка алгоритмов управления движением ЛМА на основе статистических фильтров с использованием априорной информации по оцениваемым и измеряемым параметрам. Ниже представлены уравнения на основе фильтра Калмана для определения корректирующих поправок для сигналов управления электродвигателей ( $T_p$ ,  $i = 1..4$ ) по информации с бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) о проекциях угловой скорости  $\omega_{\text{бинс}}$  и отклонениях углов  $\theta[\theta_x, \theta_y, \theta_z]$  от номинальных значений  $\theta_{\text{пр}}$ , определяемых при задании программных маневров.

$$q = (\omega, T, \theta),$$

$$r = (\delta\omega, \delta\theta),$$

$$F = E + dt \cdot A,$$

$$q1 = F \cdot q + P_s \cdot H^T \cdot S_i^{-1} \cdot (r - H \cdot F \cdot q),$$

$$P_s = F \cdot P_0 \cdot F^T + P_r,$$

$$S_i = R + H \cdot P_s \cdot H^T,$$

$$P_i = P_s - P_s \cdot H^T \cdot S_i^{-1} \cdot H \cdot P_s,$$

где  $P_i$  – ковариационная матрица оцениваемых параметров  $q1$ ;

$r$  – вектор измерений;

$E$  – единичная матрица;

$H$  – матрица измерений ( $H_{ij} = dr_i/dq_j$ ),

$Pr$  – априорная ковариационная матрица случайных возмущений –  $w$ ,

$R$  – ковариационная погрешностей измерений;

$A$  – матрица, определяемая уравнениями  $dq/dt = A \cdot q + w$ .

Учет реальных статистических характеристик случайных измерительных шумов, случайных внешних возмущений возможен путем включения их отдельных значимых (случайных систематических погрешностей измерений, частности) составляющих в состав вектора оцениваемых параметров. Однако этот путь связан с трудностями реализации подобных алгоритмов в бортовых вычислительных системах с ограниченными вычислительными возможностями (на основе микроконтроллеров в рассматриваемом случае).

В практике разработки алгоритмов управления движением сложных динамических систем, к которым относится и рассматриваемая система управления движением АП ЛМА с использованием в качестве исполнительных органов четырех устанавливаемых электродвигателей [2], важнейшим этапом выбора того или иного алгоритма является этап имитационного моделирования.

Имитационное моделирование в интегрированных программных средах проводится с целью определения динамических характеристик ЛМА и запасов устойчивости при отработке программных маневров, с учетом воздействия различных возмущающих факторов (ветровых возмущений, технологических – погрешностей задания центровочных характеристик и угловых эксцентриситетов векторов тяги), для определенного в рамках линейных моделей многомерного регулятора [3].

Решение задачи по созданию системы управления движением навигации летательного микроаппарата осложняется необходимостью определения некоторых динамических параметров ЛМА, не подлежащих точному расчету. Так, при синтезе и анализе системы управления одним из важных и необходимых параметров являются моменты

инерции и коэффициенты демпфирования ЛМА. Если моменты инерции можно определить достаточно точно при помощи систем автоматизированного проектирования, то присоединенные моменты инерции и коэффициенты демпфирования – намного сложнее.

Известно несколько способов измерения моментов инерции и коэффициентов демпфирования в составе специально разработанных стендов для ракет носителей. Однако провести измерения в составе этих стендов невозможно из-за отличия моментов инерции и коэффициентов демпфирования в  $10^6$  раз и чисел Рейнольдса в 1000 раз, а разработка и изготовление подобного стенда для ЛМА требует значительных финансовых затрат.

Особенностью рассматриваемого летательного микроаппарата является его статическая устойчивость при малых возмущениях.

Анализ результатов моделирования реакций системы управления движением ЛМА на начальное возмущение по углам курса, крена и тангажа показывает, что при определенных условиях свободной системы переходный процесс имеет колебательный характер и собственные частоты и коэффициенты демпфирования ЛМА могут быть определены.

В случае свободного движения ЛМА редуцированное уравнение движения при определенных допущениях, например по каналу тангажа, можно записать в следующем виде

$$I_{z_z} \cdot \ddot{\vartheta} + K_{D_z} \cdot \dot{\vartheta} + mg_z L \vartheta = M_{BZ_z} + M_{PZ_z} \quad (1)$$

где  $\vartheta$  – угол разворота ЛМА по оси тангажа;  
 $I_{z_z}$  и – суммарные моменты инерции и коэффициенты демпфирования ВПП относительно оси  $Z$ ;  
 $m$  – масса ЛМА;  
 $g_z$  – проекция вектора  $g$  на ось  $Z$ ;  
 $M_{BZ_z}$  – проекция момента возмущения ветра и его порывов на ось  $Z$ ;  
 $M_{PZ_z}$  – момент управления (регулятора) по оси  $Z$ .

В нашем случае  $I_{z_z}$  и  $K_{D_z}$  – неизвестны. Проведя соответствующие преобразования и полагая  $M_{BZ_z} = 0$ ,  $M_{PZ_z} = 0$ , запишем уравнение (1) в виде

$$S^2 + K_{D_z} S + \omega_0^2 = 0, \quad (2)$$

где

$$K_{D_z} = \frac{K_{D_z0}}{L_{z_z}}; \quad \omega_0^2 = \frac{mg_z L}{I_z}$$

$S^2 + K_{D_z} S + \omega_0^2 = 0$  – характеристическое уравнение ЛМА по каналу тангажа при свободном движении.

Исходя из этого, методика определения собственных частот и относительных коэффициентов демпфирования будет заключаться в следующем.

ЛМА в подвешенном состоянии задается отклонение по всем трем осям одновременно и по каждой оси в отдельности начальные отклонения по углам  $\gamma_0$ ,  $\psi_0$ ,  $\theta_0$  и измеряются угловые скорости  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  с тактом 0,01 сек, до окончания переходных процессов. По результатам измерений строятся переходные процессы от времени.

По построенным переходным процессам определяются графически период свободных колебаний  $T_{0i}$  и амплитуды колебаний ЛМА  $A_{1i}$  и  $A_{2i}$ .

Тогда

$$\omega_{0i} = 1 / T_{0i}; \quad \xi_{0i} = Ln A_{1i} / A_{2i}; \quad i = \psi, \gamma, \theta$$

или

$$i = \omega_x, \omega_y, \omega_z; \quad I_{z_z} = mg_z L T_0^2; \quad K_{di} = 2 \xi_{0i} \omega_{0i} I_i$$

Снимая данные с гироскопов и вычисляя  $I_{z_z}$  и  $K_{D_z}$ , можно получить их среднестатистические значения, а также погрешности измерений

$$\bar{I}_{i_z} = \frac{\sum_{i=1}^N I_{ij}}{N}; \quad \bar{K}_{D_{i_z}} = \frac{\sum_{i=1}^N K_{D_{ij}}}{N};$$

$$\delta I_{i_z} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (I_{ij_z} - \bar{I}_{i_z})^2}{N}};$$

$$\delta K_{D_{i_z}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (K_{D_{ij_z}} - \bar{K}_{D_{i_z}})^2}{N}}.$$

Таким образом, данная методика позволяет определить собственные частоты колебаний ЛМА и относительные коэффициенты демпфирования.

Для проведения испытаний ЛМА и определения собственных частот было разработано автоматизированное рабочее место, блок-схема которого приведена на рисунке.

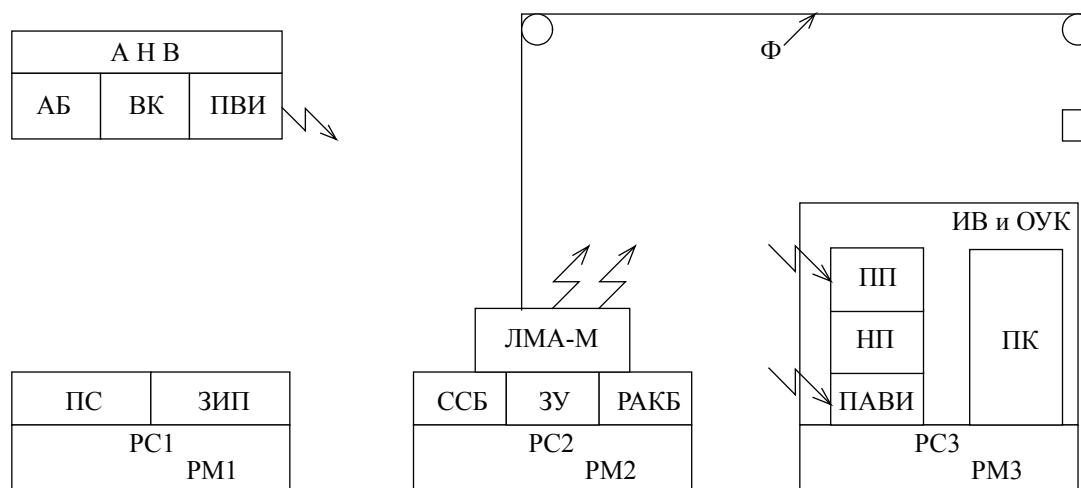


Рисунок. Блок-схема автоматизированного рабочего места по отработке макета летательного микроаппарата: АНВ – аппаратура внешнего наблюдения; АБ – аккумуляторная батарея; ВК – видеокамера; ПВИ – передатчик видеоизображения; РМ1, РМ2, РМ3 – рабочие места №1, 2, 3; РС1, РС2, РС3 – рабочие столы №1, 2, 3; ПС – паяльная станция; ЗИП – запасные приборы и инструменты; ЛМА – М – макет летательного микроаппарата; ССБ – ступень статической балансировки; ЗУ – зарядное устройство; РАКБ – резервные аккумуляторные батареи; ИВ и ОУК – информационно-вычислительный и отладочно-управляющий комплекс; ПП – приемно-передатчик команд управления и телеметрии; НП – набор по программированию бортовой системы управления движением и навигации; ПАВИ – приемник и адаптер видеоизображения; ПК – персональный компьютер; Ф – фиксатор

Т а б л и ц а

### Параметры переходных процессов двигателей ЛМА

Номер двигателя	Время переходного процесса, сек.	Постоянная времени ( $\tau$ ), сек.	Колебательность ( $\chi$ )	Частота колебаний
Д1	0,34	0,11	3	1,5
Д2	0,59	0,19	3	1,2
Д3	0,53	0,18	2	–
Д4	0,67	0,22	3	1,0

### Измерение собственных частот и коэффициентов демпфирования

Целью испытаний являлось измерение собственных частот летательного микроаппарата и коэффициентов демпфирования при неработающих и работающих двигателях.

Для проведения испытаний макета летательного микроаппарата использовалось автоматизированное рабочее место и макет ЛМА. Проводились измерения для включенных и выключенных двигателей.

Анализ полученных результатов показал, что результаты измерений собственных частот по осям  $X$  и  $Z$  близки к расчетным. Включение двигателей не приводит к резкому увеличению присоединенных моментов инерции и коэффициентов демпфирования.

Обобщенные параметры переходных процессов приведены в таблице.

Анализ характеристик показывает, что постоянные времени двигателей имеют большой разброс от 0,11 сек до 0,22 сек, что требует отбора двигателей для каждого макета ЛМА.

Также требуется провести моделирование по определению влияния разброса постоянной времени двигателей на устойчивость системы управления и провести перерасчет коэффициентов регулятора системы управления с учетом реальных постоянных времени двигателей.

Исследование динамических характеристик экспериментального ЛМА, проведенное путем математического моделирования контура управления ЛМА с использованием

статистических характеристик погрешностей реальных инерциальных датчиков и расчетных конструктивных и динамических параметров экспериментального ЛМА, показало:

1. Приемлемые качество и точность (в пределах  $\pm 50$  м) регулирования параметров движения ЛМА могут быть достигнуты при ограничении систематической погрешности измерения угловой скорости по вертикальному каналу до уровня  $\sim 0,4$  рад/с (заданная экспериментальная характеристика составляет  $\sim 1,4$  рад/с).

2. Точность регулирования параметров движения ЛМА улучшается до уровня  $\sim \pm 10$  м в случае уменьшения дискретности выдачи сигналов датчиками внешней информации (*GPS* – приемник, высотомер) до 0,1 секунды.

3. Возможным направлением повышения качества и точности регулирования параметров движения ЛМА является разработка и реализация в бортовом микроконтроллере алгоритма оценки и учета систематических погрешностей инерциальных датчиков и погрешностей начальной ориентации ЛМА с использованием априорной информации о ста-

тистических характеристиках погрешностей при обработке сигналов датчиков внешней информации.

### Библиографический список

1. Мезенцев, А.П. Интегрированные навигационные системы для мобильных комплексов локального мониторинга урбоэкосистем на основе автономно пилотируемых летательных микроаппаратов / А.П. Мезенцев, В.М. Ачильдиев, С.В. Абрамов и др. // Сборник докладов X Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2003. – С. 22–24.
2. Абрамов, С.В. Интегрированная система управления автономно пилотируемого летательного микроаппарата. Научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова / С.В. Абрамов, С.С. Емельянов, В.В. Воробушкин // Сборник докладов. – М., 2003. – С. 93–105.
3. Абрамов, С.В. Разработка и изготовление стенда для имитационного и полунатурного моделирования режимов работы систем управления летательного микроаппарата / С.В. Абрамов, В.М. Ачильдиев, А.Н. Наумов и др. // Научно-технический отчет по ОКР. ФГУП НИИ ПМ. – 2004. – 98 с.
4. Есаков, В.А. Модальный синтез и оптимизация параметров систем автоматического управления: учеб. пособие / В.А. Есаков, В.М. Ачильдиев. М.: МГУЛ, 2006.

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

М.Г. ПЕСЕЛЬНИК, *асп. каф. систем автоматического управления МГУЛ*

*peselnik@gmail.com*

**В** настоящее время многие современные автомобили оснащаются системой автоматического управления скоростью транспортного средства, называемой круиз-контролем. Эта система позволяет при отпущенной педали газа поддерживать заданную водителем скорость движения автомобиля. Это обеспечивает, с одной стороны, экономию топлива, а с другой – удобство для водителя, которому не требуется постоянно удерживать нажатой педаль газа. Кроме того, системы круиз-контроля используются для ограничения максимальной допустимой скорости движения транспортного средства (например в городе или определенном участке дороги) [1, 2].

Впервые система управления скоростью транспортного средства была придумана в 1945 г. изобретателем и механиком Ральфом Титором. Система вычисляла скорость движения по частоте вращения карданного вала и с помощью соленоида изменяла положение дроссельной заслонки.

С тех пор система автоматического управления скоростью движения транспортного средства претерпела множество изменений. Развитие цифровой техники и широкое внедрение электронного управления двигателем и многими системами автомобиля сделали возможной реализацию круиз-контроля, для которых не требуется больших финансовых затрат. В электронном блоке управления авто-



мобилия реализуются алгоритмы управления, позволяющие автоматически увеличивать крутящий момент двигателя при подъеме в гору и уменьшать его при спуске (некоторые системы могут также управлять тормозами), обеспечивая поддержание постоянной скорости движения. Заданная скорость движения выбирается водителем при помощи кнопок управления на руле или рычагах переключения поворотников. Выбранная скорость движения и режим работы круиз-контроля может отображаться на дисплее бортового компьютера или на комбинации приборов [1, 2].

В данной работе рассматривается универсальная адаптивная система управления скоростью транспортного средства (круиз-контроль). Задачей данной системы является поддержание заданной скорости движения при различных внешних возмущениях с помощью изменения крутящего момента двигателя и управления тормозной системой. Система включает измерительные устройства, органы управления, системы обработки и отображения информации.

Блок-схема системы автоматического управления скоростью представлена на рис. 1.

Основой системы управления скоростью является **система обработки информации**, которая будет рассмотрена в данной работе. Под системой обработки информации понимаются алгоритмы управления, заложенные в электронный блок управления. Поэтому будем в дальнейшем под системой управления скоростью понимать именно систему обработки информации.



Рис. 1. Блок-схема системы автоматического управления скоростью

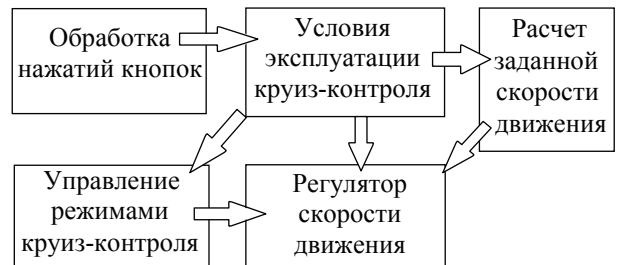


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления скоростью

Структурная схема системы автоматического управления скоростью реализует блочный (модульный) принцип построения, при этом каждый модуль выполняет свои функции. Это позволяет добиться универсальности системы и ее легкой подстройки под требования различных заказчиков. Структурная схема системы автоматического управления скоростью представлена на рис. 2.

Для изменения крутящего момента используется закон пропорционально-интегрального регулирования. При этом разность между заданным и текущим значениями скорости используется для вычисления коэффициента пересчета в крутящий момент.

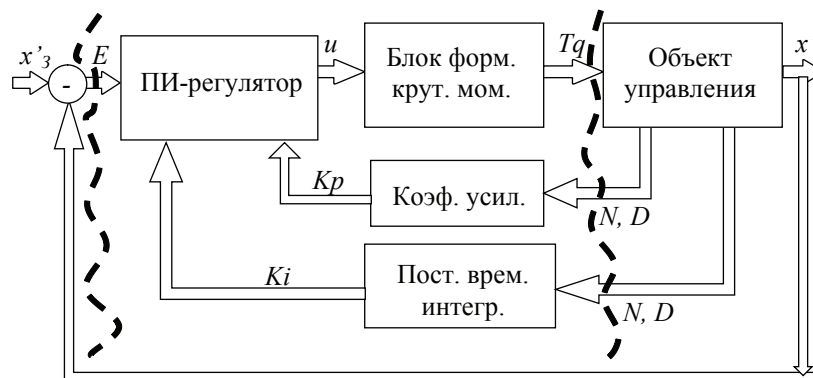


Рис. 3. Структурная схема регулятора скорости движения:  $x'_3$  – заданная скорость движения;  $x'$  – текущая скорость движения;  $E$  – ошибка по скорости;  $u$  – закон управления ПИ-регулятора;  $K_p$  – коэффициент усиления ПИ-регулятора;  $K_i$  – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора;  $T_q$  – необходимый крутящий момент;  $N, D$  – режимная точка работы двигателя и транспортного средства (частота вращения двигателя и передача)

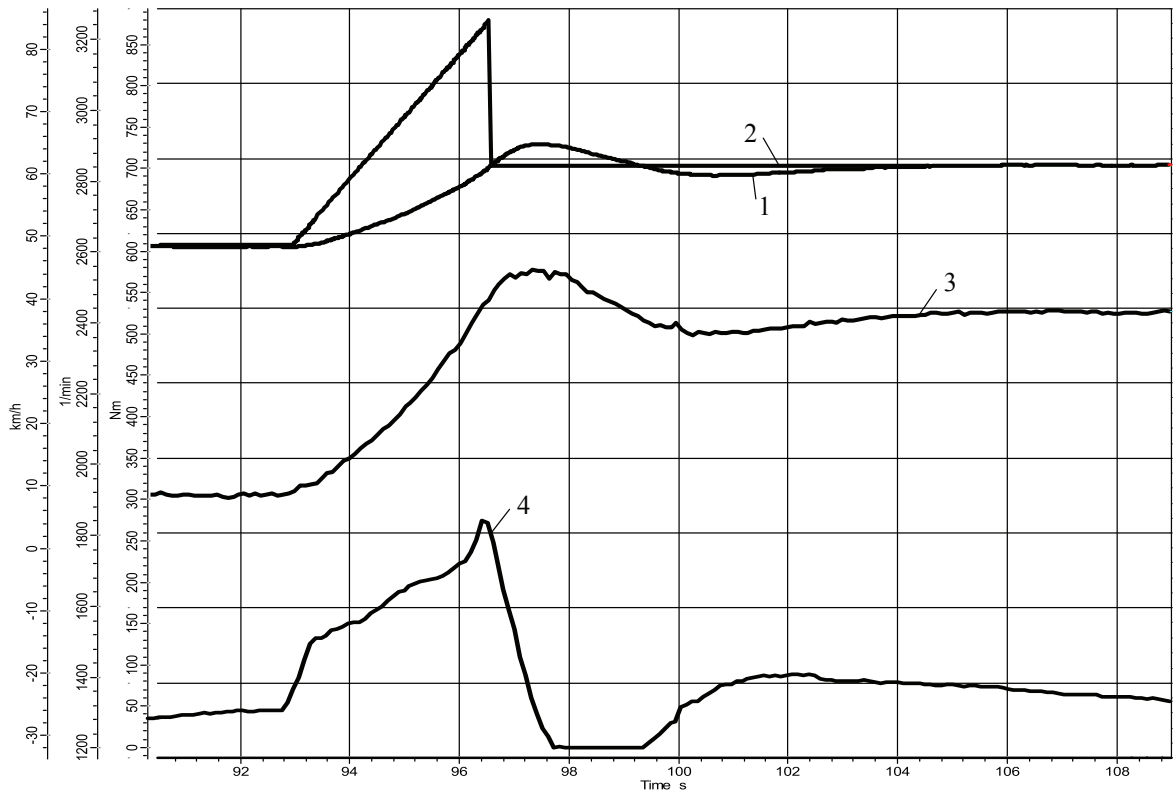


Рис. 4. Реакция системы на плавное увеличение заданного значения скорости движения: 1 – скорость движения автомобиля; 2 – заданное значение скорости движения; 3 – скорость вращения коленвала; 4 – крутящий момент

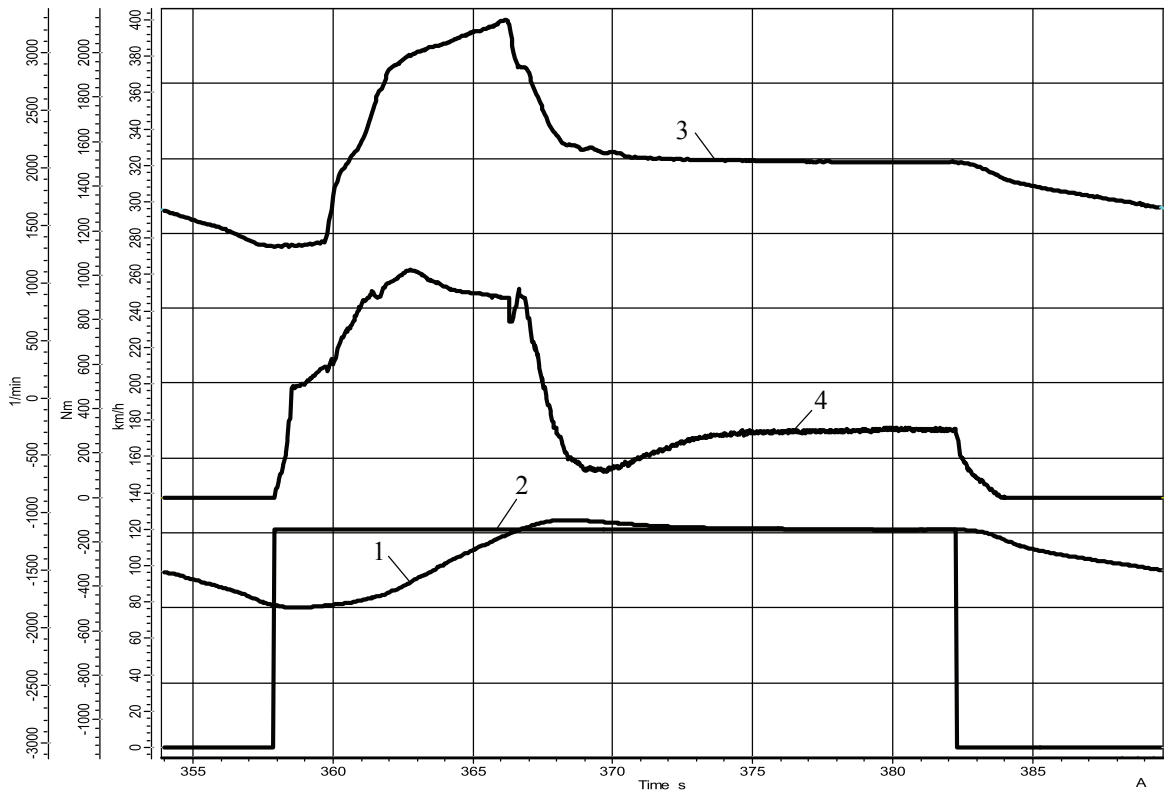


Рис. 5. Реакция системы на скачкообразное увеличение заданного значения скорости движения: 1 – скорость движения автомобиля; 2 – заданное значение скорости движения; 3 – скорость вращения коленвала; 4 – крутящий момент

Параметры ПИ-регулятора (коэффициент усиления и постоянная времени интегрирования) являются функциями режимной точки двигателя (частоты вращения двигателя и передачи). Эти параметры записываются в интерполяционные карты во время экспериментальной калибровки и при работе системы могут изменяться.

Закон управления, сформированный ПИ-регулятором, подается на блок формирования крутящего момента, где и рассчитывается необходимый крутящий момент. На рис. 3 представлена структурная схема регулятора скорости движения.

Система автоматического управления скоростью движения транспортного средства была разработана и успешно внедрена на фирме Siemens VDO Automotive в систему управления двигателя ТАТА 31 EU4 (Индия). Ниже приведены результаты экспериментов.

Как видно, заданное значение скорости движения транспортного средства увеличивается достаточно быстро (93 с – 98 с) с 50 км/ч до 85 км/ч, при этом система обеспечивает комфортное и безопасное для водителя ускорение [3], ограничивая градиент изменения скорости движения. После установления заданной скорости (97 с) текущая скорость сравнивается с заданной через 6 секунд с допустимым перерегулированием 2 км/ч.

Водитель возобновляет работу системы круиз-контроля (358 с) и активирует последнее заданное значение скорости. Текущая скорость меняется с 80 км/ч до 120 км/ч за 14 секунд, с допустимым перерегулированием в 2 км/ч.

Разрабатываемая система отличается от существующих систем автоматического регулирования скорости алгоритмами управления, заложенными в электронный блок управления, а именно – адаптивным механизмом настройки коэффициентов ПИ-регулятора, что позволяет системе качественно и эффективно функционировать в широком диапазоне задаваемых режимов. Разработанная система также отличается широкой универсальностью, что позволяет легко подстроить ее под различных производителей транспортных средств и требования законодательств других стран.

#### Библиографический список

1. Vehicle Dynamics and Control. Rajesh Rajamani. Birkhduser, 2006. ISBN 0387263969, 9780387263960. с: 470
2. Adaptive Cruise Control. Ronald K. Jurgen, Society of Automotive Engineers. Society of Automotive Engineers, 2006. ISBN 0768017920, 9780768017922. с: 474
3. Automotive Safety Handbook. Ulrich Seiffert, Lothar Wech, Society of Automotive Engineers. SAE International, 2003. ISBN 076800912X, 9780768009125. с: 283

## СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

С.С. РЯЗАНОВ, *ведущий инженер-конструктор ОАО «НПО Геофизика-НВ»*

*glmnems@geo-nv.ru*

В области микромеханики представлено множество устройств на основе микроэлектромеханических структур (МЭМС). Ключевые приборы здесь – датчики и исполнительные механизмы, преобразующие данные среды в электронные сигналы. Одно из направлений в МЭМС получили датчики положения, такие как системы позиционирования [4].

Системы позиционирования предназначены для измерения углового положения корпуса прибора относительно горизонта и

линейного ускорения. Системы позиционирования являются измерителями проекции ускорения силы тяжести с индикацией полученного сигнала в цифровом виде.

Одна из таких схем построения систем позиционирования на основе двух ММА представлена на рис. 1. Система позиционирования содержит плату модуля позиционирования 1, установленную в корпус 2, выполненный из сплава алюминия. Плата модуля позиционирования 1 закреплена с помощью винтов 6.

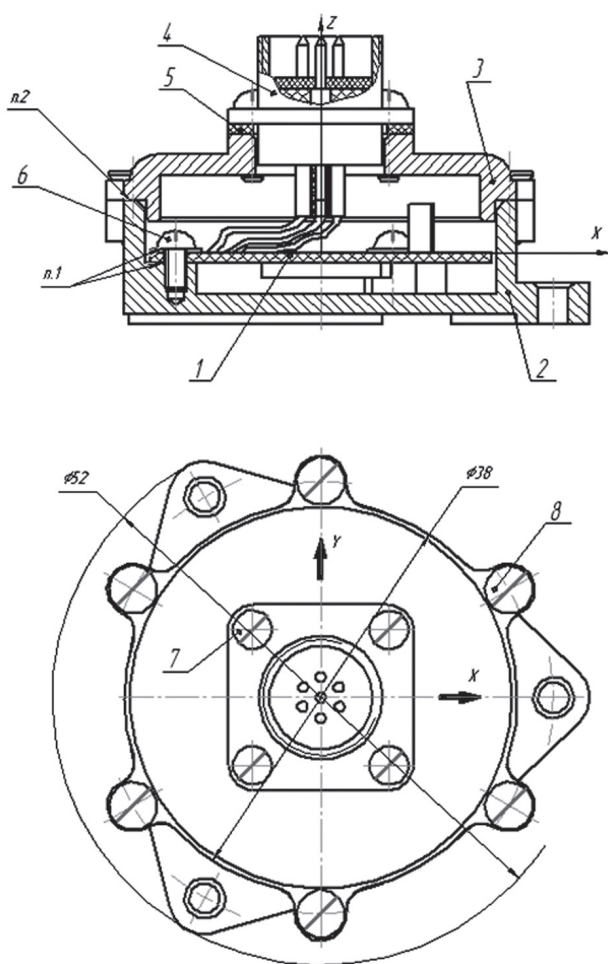


Рис. 1. Конструкция системы позиционирования

При установке платы в корпус 2 на установочную плоскость, а также в места установки винтов наносится клей, для того чтобы с помощью него и требуемого количества оборотов винтов закрепить и при этом компенсировать температурную деформацию. На крышке закреплен с помощью винтов 7 электрический разъем 4 через прокладку 5 для герметизации системы позиционирования. Перед тем как корпус 5 закрыть крышкой 3 и закрепить с помощью винтов 8, посадочное место промазывают герметиком.

В зависимости от назначения системы позиционирования имеют различные диапазоны измерения. Для каждого диапазона углов, линейных ускорений и угловых скоростей измерители изготавливаются отдельно. Для обеспечения унификации измерителей и повышения точности измерений в области измерения углов в диапазоне менее  $90^\circ$  вводят поправку на диапазон измерения. В состав платы модуля позиционирования 1 вхо-

дят (рис. 2): последовательно соединенные двухкоординатный измеритель ускорения 9 на основе микромеханических акселерометров (ММА), блок операционных усилителей 10, микроконтроллер 11, блок интерфейса 12. Блок операционных усилителей 10 состоит из операционных усилителей 13, в обратную связь которых включены электронные потенциометры 14.

Первый выход двухкоординатного измерителя ускорения 9 ( $U_{ax}$ ) соединен с первым входом блока операционных усилителей 10, второй выход двухкоординатного измерителя ускорения ( $U_{ay}$ ) соединен со вторым входом блока операционных усилителей 10, первый выход которого ( $U_\alpha$ ) соединен с первым входом микроконтроллера 11, первый выход которого ( $K_{ax}$ ) соединен с первым входом блока операционных усилителей 10, причем первым входом блока операционных усилителей 10 является вход блока электронных потенциометров 14, второй выход блока операционных усилителей 10 ( $U_\beta$ ) соединен со вторым входом микроконтроллера 11, второй выход которого соединен со вторым входом блока операционных усилителей, третий выход микроконтроллера 11 соединен с входом – выходом 1 блока интерфейса 12.

Работа системы позиционирования осуществляется следующим образом. Сигналы  $U_{ax}$  и  $U_{ay}$  с выхода ММА поступают на соответствующие входы блока операционных усилителей, где усиливаются и на выходе вычисляются по формуле

$$U_\alpha = K_d \cdot U_{ax}, U_\beta = K_d \cdot U_{ay},$$

где  $K = 90 / D$  и  $0 < D \leq 90$ .

С выходов блока операционных усилителей сигналы  $U_\alpha$  и  $U_\beta$  поступают на входы микроконтроллера, в котором по приведенным выше формулам определяют углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Величина  $K_d$  определяется величиной сигнала, поступающего с микроконтроллера на электронные потенциометры 14 блока операционных усилителей 10.

Способ измерения углов позиционирования заключается в следующем. Двухкоординатный измеритель ускорения силы тяжести 9 выдает напряжение  $U_{ax}$ ,  $U_{ay}$ , пропорциональное действующей величине проекции ускорения на соответствующую ось.



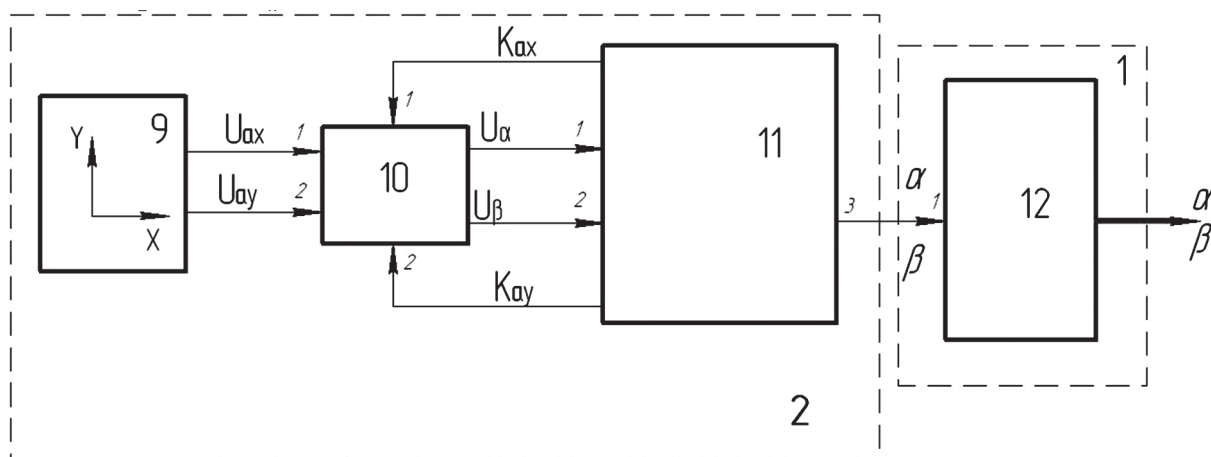


Рис. 2. Блок-схема системы позиционирования с двумя ММА

Величина этой проекции зависит от положения корпуса измерителя и определяется углом наклона  $\alpha$ ,  $\beta$  к горизонту из соотношения

$$\begin{aligned} U_{ax} &= K_{ax} \sin \alpha, \\ U_{ay} &= K_{ay} \sin \beta, \end{aligned}$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести [м/с<sup>2</sup>];

$U_{ax}$ ,  $U_{ay}$  – напряжения, снимаемые с микромеханических акселерометров (ММА) по соответствующим осям [В];

$K_{ax}$ ,  $K_{ay}$  – масштабные коэффициенты ММА [В\*с<sup>2</sup>/м];

$\alpha$ ,  $\beta$  – углы относительно горизонта.

Таким образом, выходное напряжение с измерителя определяется величиной измеряемого угла наклона  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Вычисление измеряемых углов осуществляется по выражениям

$$\alpha = \arcsin \frac{U_{ax}}{K_d \cdot g}, \quad \beta = \arcsin \frac{U_{ay}}{K_d \cdot g}.$$

Для этого в микропроцессоре проводятся следующие математические операции

$$\alpha = \arcsin \frac{U_{ax}}{K_d \cdot K_{ax} \cdot g}, \quad \beta = \arcsin \frac{U_{ay}}{K_d \cdot K_{ay} \cdot g},$$

Для повышения точности определения углов, лежащих в пределах от 45° до 90°, вычисления углов проводятся по выражениям

$$\sin \alpha = \frac{U_{ax}}{K_d \cdot K_{ax} \cdot g};$$

$$\sin \beta = \frac{U_{ay}}{K_d \cdot K_{ay} \cdot g};$$

$$\alpha = \arccos \sqrt{1 - \sin^2 \alpha};$$

$$\beta = \arccos \sqrt{1 - \sin^2 \beta}.$$

Расчет проводился вычислением функций  $\{\arcsin(\dots)\}$  разложением их в ряд. В расчетах значений ряда учитывался 21 член включительно. Углы наклона в диапазоне до  $\pm 45^\circ$  вычислялись по значению  $\{\sin(\dots)\}$ , более  $\pm 45^\circ$  – вычисления проводились по  $\{\cos(\dots)\}$ . Результаты расчета погрешности определения углов системы позиционирования в диапазоне  $0^\circ$  до  $90^\circ$  приведены на рис. 3.

При использовании двухкоординатного измерителя прибор имеет два выхода, напряжения на которых изменяются независимо друг от друга в зависимости от наклона измерителя относительно одной или другой оси или одновременно относительно обеих. При этом способе измерения достаточно двух измерителей линейного ускорения вместо трех. Реализация данного способа измерения непосредственно в системе позиционирования осуществляется путем установки в цепь обратной связи операционных усилителей 13 электронных потенциометров 14, обеспечивающих коэффициент обратной связи (от 1 до 9) в зависимости от диапазона измеряемых углов. Данная схема включения позволяет изменять коэффициент обратной связи операционного усилителя 13 по команде микропроцессора в зависимости от диапазона углов, на который рассчитано изготавливаемое устройство. Эта операция осуществляется в процессе изготовления или перепрограммирования устройства.

Работа системы позиционирования одинакова при определении значений углов относительно той или другой оси.

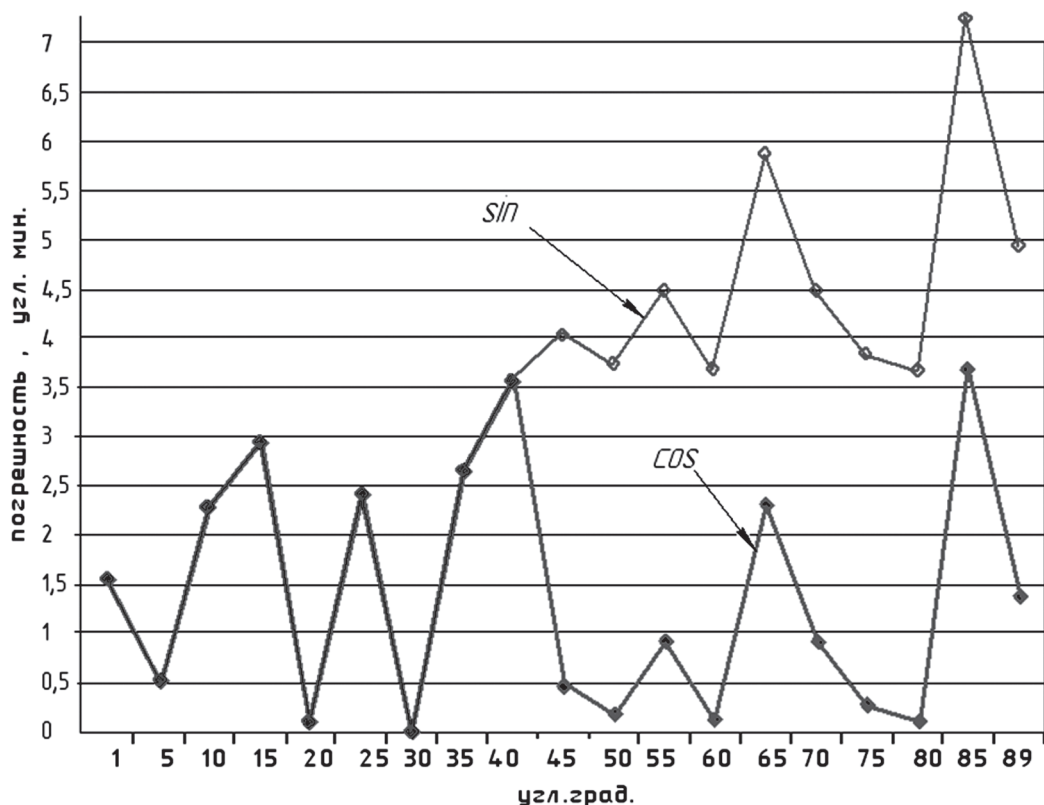


Рис. 3. График расчета погрешности

Одним недостатком микромеханических датчиков является зависимость их показаний от температуры. Как показали испытания, в основном они близки к линейному, поэтому показания системы позиционирования могут быть скорректированы с использованием зависимости [2, 3]

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_0),$$

где  $\alpha(t)$  – показания УФСП;

$\alpha_0, \alpha_1$  – коэффициенты, характеризующие зависимость показания УФСП от температуры;

$t_0$  – номинальная температура.

Коэффициенты для каждой УФСП определяются по результатам испытаний в рабочем диапазоне температур и записываются в микропроцессор. При использовании метода наименьших квадратов будем иметь

$$\alpha_0 = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha(t) \sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \cdot \sum_{i=1}^n \alpha(t) \cdot (t_i - t_0)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n (t_i - t_0))^2},$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \alpha(t) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \cdot \sum_{i=1}^n \alpha(t_i)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n (t_i - t_0))^2},$$

где  $\alpha(t_i)$  – показание системы позиционирования при фиксированной  $t$  – температуре;

$n$  – число измерений в заданном диапазоне температур.

Погрешность аппроксимации  $\delta\alpha$  при этом определяется выражением

$$\delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\alpha(t_i) - (\alpha_0 + \alpha_1 t_i)]^2}{n}}.$$

Поправочный коэффициент  $\alpha_1$  записывается в ПЗУ на каждую систему. На основании этого коэффициента может вводиться поправка на показания уровня в широком диапазоне температур.

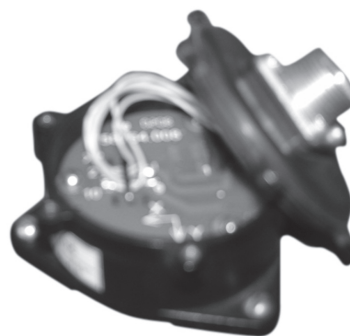


Рис. 4. Внешний вид системы позиционирования

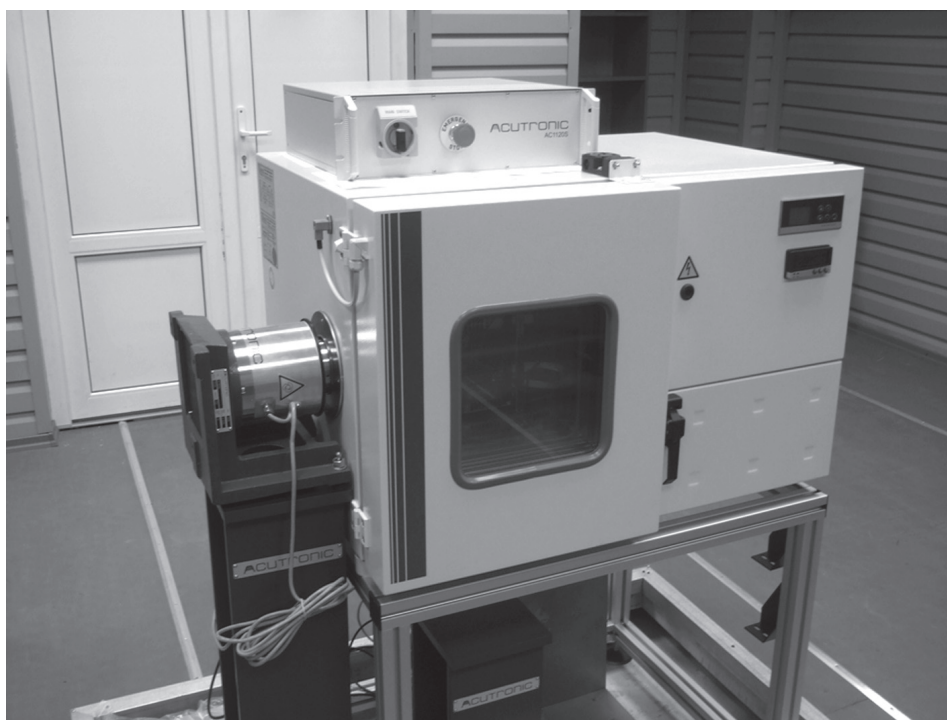


Рис. 5. Стенд AC1120V.2.3

Т а б л и ц а

**Результаты предварительных испытаний систем  
позиционирования на стенде AC1120V.2.3**

Параметры	Требования по ТЗ	Полученные значения
Объем, см <sup>3</sup>	125	45
Габариты, мм	50×52×52	Ø52×25
Масса, г	200	65
Удар, g	40	40
Диапазон измерения ускорений, g	1,2	1,7
Количество измерительных осей, шт.	2	2
Диапазон измерения углов, град.		10,30,45,60,90
Погрешность измерения углов, град.		0,1, 0,2, 0,3
Погрешность смещения нуля, g		0,002
Спектральная плотность шума, мг/Гц <sup>1/2</sup>	0,15	0,2
Нелинейность МК, %	0,5	0,2
Полоса частот, Гц	10	2000
Неортогональность осей чувствительности акселерометров, сек		75,0
Ресурс, ч	20000	20000
Диапазон рабочих температур, °С		- 40 + 85
Интерфейс		RS-232

Проведенные испытания системы позиционирования (фотография одной из них приведена на рис. 4, в составе стенда AC1120V.2.3 – рис.5) при изменении температуры от -40 °С до +60 °С показали, что зависимость показаний от температуры измерителя углов относительно горизонта носит линейный характер. С учетом компенса-

ции температурная погрешность измерений уменьшилась примерно в 5 раз. Некоторые результаты предварительных испытаний системы позиционирования на стенде AC1120V.2.3 приведены в таблице.

Работа системы позиционирования одинакова при измерении углов относительно той или другой оси.

**Заключение**

– разработан метод измерения улов относительно горизонта, схема построения системы позиционирования и алгоритмы обработки информации;

– разработана методика и алгоритм обработки результатов измерений идентификации паспортизируемых параметров микромеханических акселерометров в составе систем позиционирования;

– разработан метод алгоритмической компенсации погрешностей из-за изменения температуры окружающей среды, напряжения питания и нелинейности масштабного коэффициента;

– разработана процедура сертификации систем позиционирования оптико-электронных систем, методика и алгоритм обработки информации при ресурсных испытаниях, поз-

воляющая сократить время ресурсных испытаний в десятки раз, что позволяет создать целый ряд новых изделий для народного хозяйства, военной и ракетно-космической техники.

**Библиографический список**

1. Ачильдиев, В.М., Грузевич Ю.К., Рязанов С.С. и др. Способ определения уклонов и система позиционирования для его осуществления. Заявка на изобретение. Регистрационный №2008114901 от 18.04.2008 г.
2. Ачильдиев, В.М. Системы управления средств выведения и их сертификация / В.М. Ачильдиев, С.М. Вязов, Э.А. Колоезный и др. – М.: МГУЛ, 2004. – С. 175.
3. Ачильдиев, В.М. Бесплатформенные инерциальные блоки на основе микромеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения / В.М. Ачильдиев. – М.: МГУЛ, 2007.
4. Electro-optical imaging: system performance and modeling\ L. Biberman, editor. – SPIE Press, 2000, – 645 p.

## СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ

В.А. СОЛДАТЕНКОВ, *генеральный директор ОАО «НПО Геофизика-НВ»*,  
 Ю.К. ГРУЗЕВИЧ, *заместитель генерального директора по науке ОАО «НПО Геофизика-НВ»*,  
 В.М. АЧИЛЬДИЕВ, *главный конструктор МНЭМС ОАО «НПО Геофизика-НВ»*,  
 В.В. ПОЗДНЯКОВ, *главный конструктор НСЦИ ОАО «НПО Геофизика-НВ»*,  
 А.Д. ЛЕВКОВИЧ, *инженер ОАО «НПО Геофизика-НВ»*

*glmnews@geo-nv.ru*

Появление микромеханических датчиков и бесплатформенных инерциальных блоков на их основе позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики различных оптико-электронных систем. Использование бесплатформенного инерциального блока (БИБ) на базе микромеханических гироскопов и акселерометров, магнитометра, альтиметра, микропроцессора, приемника GPS/Глонасс и лазерного дальномера позволяет синтезировать новый тип оптико-электронных приборов (ОЭП), предназначенных для определения координат удаленного объекта [2]. На основе БИБ возможно также создание систем ориентации для наשלемных систем целеуказания и индикации НСЦИ[1]. Нашлемные системы целеуказания и индикации являются неременной принадлежностью оборудования современных самолетов и

вертолетов. Использование микромеханических бесплатформенных инерциальных систем ориентации (МБИСО) позволит существенно увеличить диапазон измерения углов и повысить точность в диапазоне больших углов.

Структурная схема ОЭУН (оптико-электронное устройство наблюдения) приведена на рис. 1.

Оператор 8 наблюдает изображение объекта 7 на фоне окружающей местности. После того как оператор нажимает на кнопку «Измерить», лазерный дальномер 1 вычисляет расстояние до объекта и передает это расстояние указателю курса и позиции оперетатора 3. Эти данные через радиointерфейсы 9 и 10 отправляются в компьютер, который рысчитывает сферические координаты объекта и посылает их указателю курса и позиции оператора 3, после чего они отобража-



ются на индикаторе 11. Блок-схема указателя курса и позиции 3 показана на рис. 2.

Микропроцессор 16 осуществляет предварительную обработку данных, поступающих с датчиков 12, 13, 14, 15. Далее эти данные через радиointерфейс передаются в компьютер, который производит дальнейшую обработку данных. Бесплатформенный инерциальный блок 13 содержит (не показаны) три микромеханических гироскопа, три микромеханических акселерометра, ориентированных соответственно по трем взаимно перпендикулярным измерительным осям. По их показаниям блок 13 вычисляет углы крена и тангажа оптоэлектронного наблюдательного прибора и передает в микропроцессор 16 указателя курса и позиции наблюдателя.

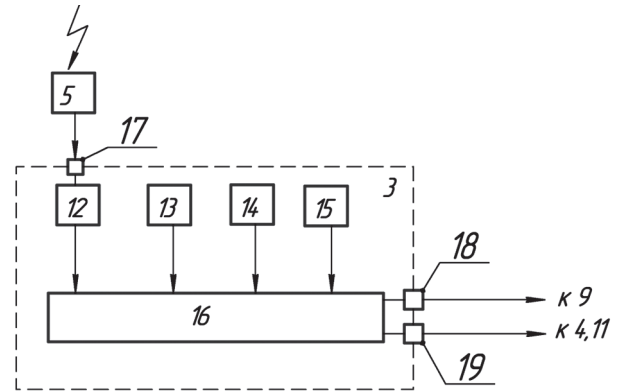


Рис. 2. Блок-схема указателя курса и позиции: 5 – антенна GPS/Глонасс; 4 – оптоэлектронный наблюдательный прибор; 9 – радиointерфейс для связи с компьютером; 11 – индикатор указателя курса и позиции оператора и объекта; 12 – приемник GPS/Глонасс; 13 – бесплатформенный инерциальный блок; 14 – магнитометр; 15 – альтиметр (барометрический высотомер); 16 – микропроцессор; 17 – разъем для подключения антенны GPS; 18 – разъем для подключения радиointерфейса связи с компьютером; 19 – разъем для подключения индикатора указателя курса и позиции

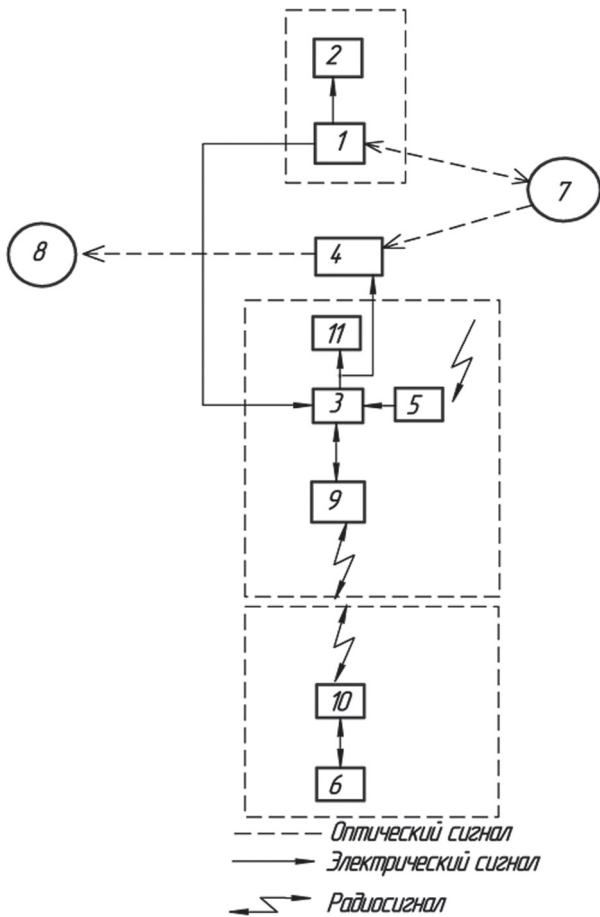


Рис. 1. Структурная схема ОЗУН: 1 – лазерный дальномер; 2 – индикатор лазерного дальномера; 3 – указатель курса и позиции оператора; 4 – оптоэлектронный наблюдательный прибор; 5 – антенна GPS/Глонасс; 6 – компьютер; 7 – объект; 8 – наблюдатель; 9 – радиointерфейс для связи с компьютером; 10 – радиointерфейс для связи с прибором; 11 – индикатор указателя курса и позиции оператора и объекта

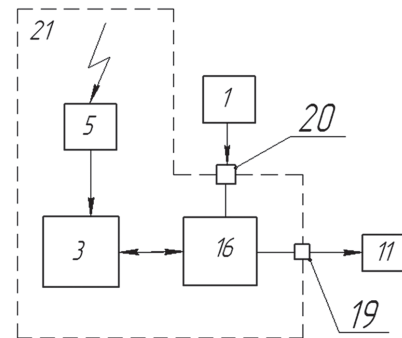


Рис. 3. Блок-схема указателя курса и позиции оператора и объекта 21: 1 – лазерный дальномер; 3 – указатель курса и позиции оператора; 5 – антенна GPS/Глонасс; 11 – индикатор указателя курса и позиции оператора и объекта; 16 – микропроцессор; 19 – разъем для подключения индикатора указателя курса и позиции; 20 – разъем для подключения лазерного дальномера

На рис. 4 изображена оправа с полупрозрачной пластиной и дополнительным индикатором для отображения координат объекта на его изображении.

Изображение индикатора 32, формируемое оптической системой 31, преломляется полупрозрачной пластиной 30 и поступает в объектив оптоэлектронного наблюдательного прибора вместе с изображением удаленного объекта. Оператор видит и изображение местности и координаты удаленного объекта.

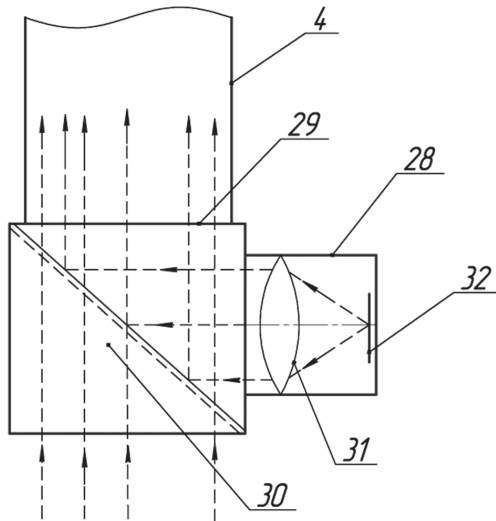


Рис. 4. Оправа с полупрозрачной пластиной для отображения на изображении координат оператора и объекта: 4 – опико-электронный наблюдательный прибор; 29 – оправка с полупрозрачной пластиной и дополнительным индикатором; 28 – корпус индикатора; 30 – полупрозрачная пластина; 31 – оптическая система для формирования изображения индикатора; 32 – индикатор курса и позиции оператора и объекта

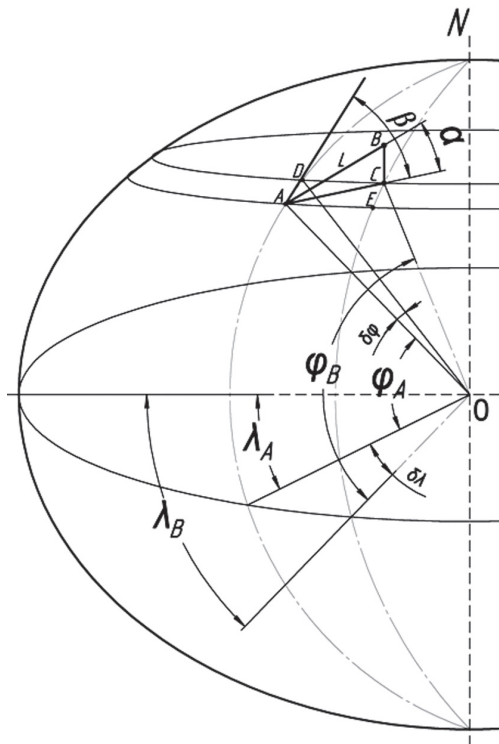


Рис. 5. Система координат, используемая в опико-электронном устройстве наблюдения

Способ измерения координат удаленного объекта на местности практически осуществляется тем, что наблюдатель производит сканирование местности опико-электрон-

ным наблюдательным прибором с контролем и фиксацией в момент измерения положения прибора относительно местного горизонта и курса, его координат и расстояния от объекта до наблюдателя, которые поступают в микропроцессор, вычисляются координаты объекта, запоминаются и фиксируются на электронном изображении объекта и индикаторе [2].

На рис. 5 представлены системы координат, поясняющие способ измерения координат удаленного объекта.

На рис. 5 точкой *A* обозначено положение оператора, точкой *B* – положение объекта.

Пусть известны широта  $\varphi_A$ , долгота  $\lambda_A$  и высота  $H_A$  точки *A*, расстояние  $L$  до точки *B*, угол курса  $\beta$  (угол между направлением на северный полюс и направлением на объект), угол тангажа  $\alpha$ . Поскольку максимальная измеряемая дальность не превышает 10 км, а при расстояниях меньше 10 км, заменяя дуги *AC*, *AD*, *CE*, *AE* касательными в точке *A*, сделаем ошибку меньшую 1 : 1 000 000 длины этой дуги, то для вычисления долготы и широты будем считать, что точки *A*, *E*, *C*, *D* расположены на плоскости. При измерении вертикальных расстояний нельзя пренебрегать кривизной Земли даже при небольших горизонтальных расстояниях между точками.

Высота точки *B* вычисляется по формуле

$$H_B = H_A + L \sin(\alpha) + 1/2(AC^2/R_3).$$

Последний член учитывает прогиб Земли  $Dh = 1/2(AC^2/R_3)$ . Проекция расстояния  $L$  на наклонную плоскость вычисляется по формуле  $L_{np} = AC = L \cos(\alpha)$

Приращение широты  $\delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$  определим из треугольника *ADO* по теореме косинусов

$$\cos(\delta\varphi) = \frac{2(R_3 + H_A)^2 - AD^2}{2(R_3 + H_A)^2},$$

где  $AD = AC \cdot \sin(\nu)$ ,  $R_3 = 6\,378,1$  км – радиус Земли

Приращение долготы  $\delta\lambda = \lambda_B - \lambda_A$  определим из треугольника *ADC* по теореме косинусов

$$\delta\lambda = \frac{2(R_3 + H_A)^2 - AE^2}{2(R_3 + H_A)^2},$$

где  $AE = AC \cdot \cos(\nu)$

Координаты наблюдателя и объектов наблюдения

Координаты наблюдателя	№ объекта	Координаты объекта наблюдения
Широта: 55°47,638' Долгота: 37°41,847'	1	Широта: 55°47,749' Долгота: 37°41,799'
	2	Широта: 55°47,675' Долгота: 37°41,844'

Вычисленные координаты объектов

№ объекта	Измеренные значения углов крена, тангажа и курса объекта	Вычисленные координаты объекта	Погрешность определения координат объекта
1	Угол крена: 2°44' Угол тангажа -8°27': Магнитный курс: 352°25'	Широта: 55°47,642' Долгота: 37°41,879'	Долготы: 0,107' = 6.42'' Широты: -0,080' = -4.8''
2	Угол крена: 2°44' Угол тангажа -7°20': Магнитный курс: 352°25'	Широта: 55°47,651' Долгота: 37°41,955'	Долготы: 0,024' = 1.44'' Широты: -0,111' = -6.66''

Итак, формулы для расчета координат удаленного объекта имеют вид:

– широта

$$\varphi_B = \varphi_A + \arccos \left( 1 - \frac{[L \cos(\alpha) \sin(\beta)]^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right), \quad (1)$$

– долгота

$$\lambda_B = \lambda_A + \arccos \left( 1 - \frac{[L \cos(\alpha) \cos(\beta)]^2}{2(R_3 + H_A)^2} \right), \quad (2)$$

– высота

$$H_B = H_A + L \sin(\alpha) + \frac{(L \cos(\alpha))^2}{2R_3}. \quad (3)$$

Для проверки предложенного метода определения координат объекта был изготовлен макет ОЭУН, фотография которого приведена на рис. 7. Он состоит из ОЭП (в данном случае фотоаппарат), бесплатформенной навигационной системы «Компанав» фирмы «Текнол», которая подключается к компьютеру через COM порт. Данные о координатах и углах наклона оптической оси прибора считываются программой, и на основании введенной дальности до объекта вычисляются координаты удаленного объекта.

Для эксперимента были выбраны 2 объекта наблюдения, измерены их точные координаты с помощью GPS приемника и расстояние до них от точки наблюдения. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Как видно из табл. 2, максимальные погрешности определения координат объектов наблюдения составили: для долготы 199 м, для широты 206 м.

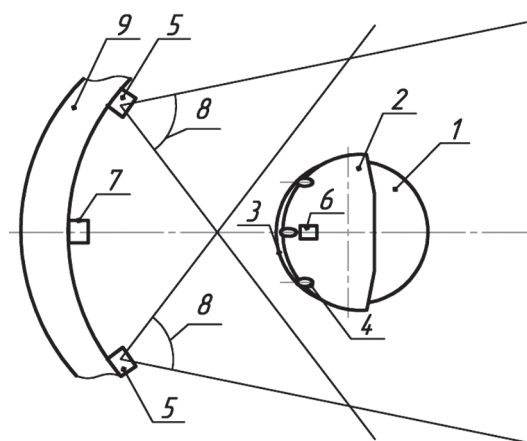


Рис. 6. Структурная схема НСО в самолете: 1 – каска шлема; 2 – нашлемный модуль; 3 – защитный светофильтр; 4 – светодиоды; 5 – датчики положения; 6 – нашлемная МБИСО; 7 – кабинная МБИСО; 8 – поле зрения ДП; 9 – козух кабин

Структурная схема нашлемной системы ориентации (НСО) на основе оптико-электронной и микромеханической бесплатформенной инерциальной системы ориентации (МБИСО) приведена на рис. 6. На первом этапе разработки в качестве МБИСО используется указатель курса и позиции, блок-схема которого приведена на рис. 2.

На передней части каски шлема 1 установлен нашлемный модуль (НШМ) 2, под козухом которого размещен откидывающийся защитный фильтр 3. На верхней части НШМ установлены инфракрасные светодиоды 4, входящие в блок ОЭ системы позиционирования (СП). Датчики положения (ДП) 5

могут быть установлены в верхней части ко-  
жуха кабины 9, а именно, на раме переплета  
остекления. В этом случае обзор датчиками  
ДП рабочей зоны является более эффектив-  
ным, особенно при больших положительных

углах места шлема. Нашлемная МБИСО 6  
устанавливается рядом с центральным све-  
тодиодом, а кабинная МБИСО 7 по центру  
симметрично относительно датчиков поло-  
жения 5.

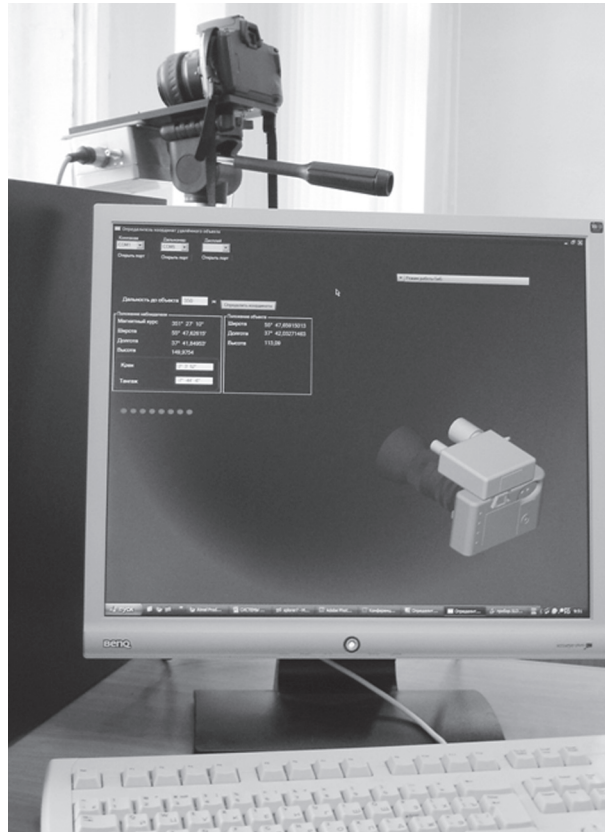


Рис. 7. Фотография макета ОЭУН



Рис. 8. Фотография макета НСО



**Накопленная ошибка и среднее квадратическое отклонение погрешности за час непрерывной работы МБИСО с МК при различных углах наклона МБИСО с МК**

Начальные условия	Накопленный угол (математическое ожидание)			Среднее квадратическое отклонение		
	Курс $\theta$	Крен $\gamma$	Тангаж $\nu$	Курс $\theta$	Крен $\gamma$	Тангаж $\nu$
$\theta = 0^\circ, \nu = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$	25'	-2,4'	11'	21'	7'	3'
$\theta = 10^\circ, \nu = 10^\circ, \gamma = 10^\circ$	10°7,4'	10°28,3'	9°45,5'	58,3'	3'	8'

Для предварительной проверки на функционирование МБИСО было создано рабочее место по имитации его работы в составе изделия. Фотография рабочего места приведена на рис. 8.

Информация об угловом положении шлема, крен, тангаж и курсовой угол относительно строительной системы координат летательного аппарата определяются вычитанием показаний нашлемного МБИСО из показаний бортового МБИСО.

На первом этапе исследований определялась накопленная ошибка по углам крена, тангажа и курса МБИСО.

Кроме того были оценены средние квадратические отклонения определения углов крена, тангажа и магнитного курса в двух сериях измерений. Эти оценки основаны на 3600 измерений, снятых за час работы прибора. Первая серия измерений была проведена при средних углах  $\theta = 0^\circ, \nu = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$  ( $\theta$  – магнитный курс,  $\gamma$  – угол крена,  $\nu$  – угол тангажа), вторая серия проведена при средних углах  $\theta = 10^\circ, \nu = 10^\circ, \gamma = 10^\circ$  (табл. 3).

Из таблицы видно, что наибольшее СКО имеет угол курса  $\theta$ . При изменении угла наклона МБИСО с МК СКО изменяются, хотя эти изменения можно объяснить и внешними воздействиями на приборы (вибрация пола, изменение температуры в помещении).

Таким образом, с наихудшей точностью определяется магнитный курс, среднее квадратическое отклонение его определения

составляет  $\delta\theta = 58.3'$ . Для углов крена и тангажа среднее квадратическое отклонение составляет  $8'$ .

### З а к л ю ч е н и е

Предложенный метод определения координат объекта позволяет расширить функциональные возможности и увеличить быстродействия прибора при обеспечении считывания сферических координат объекта из положения «с рук» без прекращения наблюдения за объектом и местностью.

Также обеспечена возможность сохранения цифрового изображения с записью времени съемки, координат наблюдателя и координат объекта. Максимальная погрешность определения координат объекта наблюдения в эксперименте составила 206 м.

Для НСЦИ максимальное среднее квадратическое отклонение определения угла курса составляет  $\delta\theta = 58.3'$ , среднее квадратическое отклонение определения углов крена и тангажа составляет  $\delta\nu = \delta\gamma = 8'$ .

### Б и б л и о г р а ф и ч е с к и й с п и с о к

1. Ачильдиев, В.М. Микромеханические системы позиционирования на основе микромеханических акселерометров и гироскопов для нашлемных систем целеуказания и индикации / В.М. Ачильдиев, Ю.К. Грузевич, В.А. Солдатенков и др. // Вестник МГТУ им. Баумана. – 2008. – № 3.
2. Беликова, В.Н., Поздняков В.В., Левкович А.Д. и другие. Устройство для измерения координат удаленного объекта на местности. Заявка на изобретение. Рег.№ 2008138902 от 01.10.2008 г.

## ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.А. БОРИСОВ, *начальник ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России», канд. техн. наук*

*yutkotov@mgul.ac.ru*

Теорию социально-экономических систем, с позиций которой можно рассматривать эволюцию отечественной электронной отрасли, следует рассматривать как частный случай общей теории сложных систем синергетики [1, 2].

Современная синергетика развивается на пересечении (синтезе) трех начал: нелинейного моделирования, практической философии и предметного знания [3]. Только этот трехкомпонентный синтез позволяет на уровне нелинейных математических моделей описывать социальные, научные и производственно-технические явления, у которых внешние воздействия приводят к качественно новому поведению системы.

В настоящее время в ходе формирования стратегии программного развития российской электроники специального назначения на период до 2020 г. актуальной является задача выбора на основе теоретических обоснований и анализа в заданной области знаний рациональной инновационной модели и принятия в соответствии с ней эффективных управленческих решений.

В ходе исследований развития отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) специального назначения стало необходимым модельное описание соответствующего инновационного процесса на основе синергетического подхода, позволяющего учитывать стохастичность (случайность) процесса инноваций и влияния на него системных факторов.

Как доказано в [4], математические методы синергетики образуют увеличивающееся множество описаний нелинейных, конечных и бесконечных динамических систем. В соответствии с ними, если представить электронную отрасль открытой динамической системой, случайность процесса инноваций

в ней может быть выражена через внешние факторы (издержек реформирования и управления в условиях кризиса, «глобализации инноваций» и др. [5]). При этом под «глобализацией инноваций» (или «инновационной глобализацией») принято понимать вовлечение в реальный инновационный процесс все большего количества участников, что снижает долю случайности (шума) в процессе инноваций.

При построении адекватных моделей (алгоритмов) развития в области ЭКБ проанализированы все возможные альтернативные технико-экономические варианты стратегии, обоснован прогноз развития при различных управляющих воздействиях и ограничивающих условиях. В ходе верификации моделей (алгоритмов) выявлен недостающий объем требуемой информации.

Динамическое моделирование развития в области ЭКБ проведено по разным направлениям (по классификационным группам, плановым периодам, в привязке к видам аппаратуры, образцам техники и т.п.).

Динамические модели можно условно разделить на две группы. К первой из них относятся модели роста технического уровня (значений критериальных или определяющих параметров), ко второй – модели их колебаний (отклонений от расчетных или предполагаемых), например, в зависимости от происходящих процессов реформирования отрасли и системы государственного заказа, глобального экономического цикла.

В целом «колебательная динамика» более соответствует реальным процессам развития ЭКБ по сравнению с типовыми нелинейными прогнозными моделями.

Для реализации системного управления развитием ЭКБ динамическое моделирование в любой из возможных его форм должно

учитывать факторы инновационного процесса (в проектировании, производственно-технологической сфере, материаловедении).

Одной из распространенных нелинейных моделей, которая достаточно хорошо описывает процессы роста показателей технического (технико-экономического) уровня является модель «распространения (диффузии) инноваций». В [4] указано на возможность использования  $S$ -образных кривых (логистической, Гомпертца, модифицированной экспоненциальной) и уравнений Лотки-Вольтера для моделирования процессов технологического развития.

В [6] показано, что процесс «диффузии инноваций», выраженный в доле выпускаемой продукции определенного технико-технологического уровня (в данном случае типаже ЭКБ), также описывается логистической кривой, являющейся решением уравнения

$$dx/dt = \lambda x/dt(Y - x), \quad (1)$$

где  $x$  – зависимый от времени показатель эволюции объекта;

$\lambda$  – скорость изменений (тренд эволюции);

$Y$  – предел изменений в рамках текущего периода.

Уравнение (1) описывает эволюцию объекта в условиях ограничений, а начало и конец инновационного производства, смена технологических укладов приводят к появлению скачков на логистических кривых. Однако оно не учитывает влияние системообразующих и субъективных факторов на эволюцию инноваций, а условия социально-экономической среды, лавинообразный характер начала процесса развития, природу скачков на логистических кривых невозможно описать с помощью имитационных моделей.

Для этого используют синергетические подходы, с помощью которых можно выявлять различные нелинейные особенности изучаемых процессов. Например, в рамках синергетического подхода предложено проводить исследования стохастичности современного развития ЭКБ специального назначения. Исходное уравнение, описывающее модель инновационного роста исследуемого объекта в рамках открытой системы, можно представить в виде [4]

$$dx/dt = A + p/Nx(N - x) - \beta x, \quad (2)$$

где  $x = x(t)$  – число предприятий электронной отрасли, участвующих в инновационном процессе на момент времени  $t$ ;

$N$  – общее число участников;  $p$  ( $p > 0$ ) – коэффициент увеличения числа предприятий-участников;

$A$  – периодичность появления новых предприятий, участвующих в процессе, в том числе из других отраслей (в силу открытости системы);

$\beta$  – коэффициент «отторжения инноваций» ( $\beta > 0$ ) (технологическое отставание, переориентирование производства, несостоятельность в конкурентной борьбе).

Второй член уравнения характеризует конкуренцию между предприятиями. Третий член уравнения учитывает замедление развития (вплоть до «отторжения инноваций») отдельными предприятиями.

В безразмерных переменных  $x' = x/N$ ,  $t' = t\beta$  уравнение (2) принимает вид

$$dx'/dt' = \alpha + \gamma x'(1 - x') - x', \quad (3)$$

где  $\alpha = A/\beta N$ ,  $\gamma = p/\beta$ ;  $x$  – переменная «инновационной активности».

В дальнейшем для упрощения записи опустим штрихи в типовом уравнении (3).

Модели, соответствующие уравнению (3), хорошо отработаны при описании стохастических процессов в термодинамике, генетике, химии, поэтому, как правило, предлагается  $\alpha = 1/2$ , при котором физический смысл происходящего имеет стационарное выражение

$$\bar{x} = [\gamma - 1 + (\gamma^2 + 1)^{1/2}]/(2\gamma). \quad (4)$$

Выражение (4) указывает на асимптотическую глобальную устойчивость его стационарных состояний [9], а значит в детерминированном случае в модели инновационного процесса (3) не происходит потери устойчивости, пока не проявляются флуктуации внешней среды (макросреды).

Флуктуации, воздействующие на систему (например, электронную отрасль, отдельный класс ЭКБ) могут вызывать в ней разные последствия. С ростом числа флуктуаций система априори неустойчива и чувствительна даже к малым или частным воздействиям (срыв ритмичности платежей, задержка с вводом в строй конкретных технологических процессов и др.).

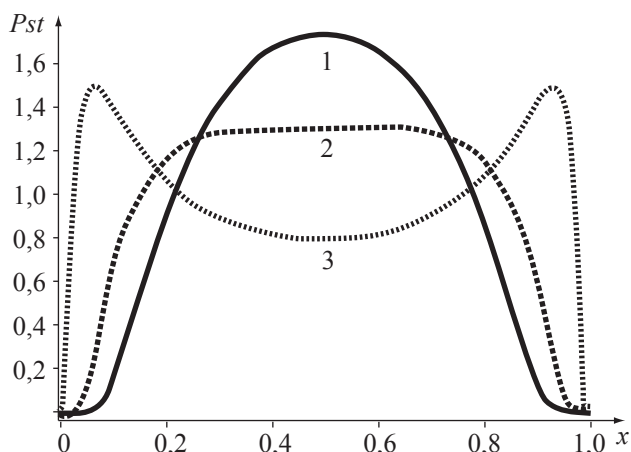


Рис. 1. Зависимость стационарной плотности вероятности распределения  $P_{st}(x)$  от инновационной активности  $x$  при  $\gamma = 0$ ,  $D = 0$  и значении интенсивности шума  $\sigma^2 = 1$  (кривая 1),  $\sigma^2 = 4$  (кривая 2),  $\sigma^2 = 16$  (кривая 3).

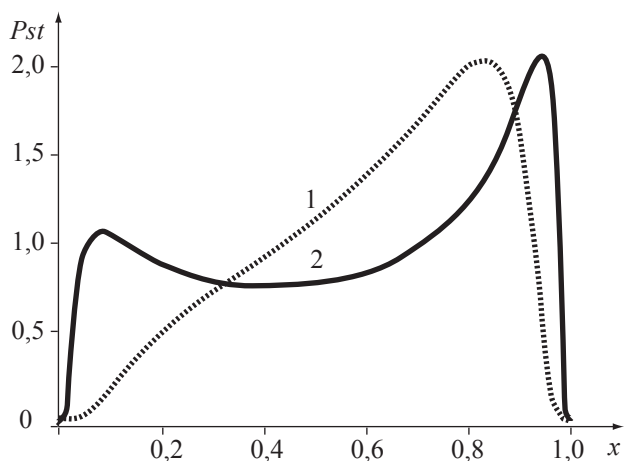


Рис. 2. Зависимость стационарной плотности вероятности распределения  $P_{st}(x)$  от инновационной активности  $x$  при  $\gamma = 1$ ,  $D = 0$  и значении интенсивности шума  $\sigma^2 = 4$  (кривая 1),  $\sigma^2 = 16$  (кривая 2).

Постепенно внешние флуктуации вызывают значительные колебания экономических параметров системы. Когда они превысят некоторые критические значения, самая малая флуктуация приводит к скачкообразному переходу системы в качественно новое состояние. Так наступает «точка бифуркации» – переломный момент в развитии системы, приводящий либо к катастрофе, либо кардинальным изменениям.

Инновации всегда сопряжены со случайностями, так что параметр  $\gamma$  в выражении (4) является флуктуирующим. В предположении, что с внутренними системными флуктуациями отрасль справляется методами самоорганиза-

ции и регуляции – параметр  $\gamma$  может быть представлен стационарным случайным процессом  $\gamma_t = \gamma + \sigma \zeta_t$ , где гауссов белый шум  $\zeta_t$  имеет нулевое среднее значение и интенсивность  $\sigma^2$

$$\langle \zeta_t(t) \rangle = 0, \langle \zeta_t(t) \zeta_{t'}(t') \rangle = \sigma^2 \delta(t - t'). \quad (5)$$

Следует отметить, что инновационный процесс в области ЭКБ протекает в пространстве множества технологий (что должно быть учтено через взаимодействие между различными предприятиями-участниками разработок) и вызывает явление «инновационной глобализации».

Тогда в соответствии с [4], для участников инновационного процесса может быть справедливо дифференциальное уравнение вида

$$dx_i/dt = f(x_i) - D/M \sum_{j=1}^M (x_i - x_j) + g(x_i) \zeta_i(t), \quad (6)$$

при

$$f(x_i) = \alpha + \gamma x_i(1 - x_i) - x_i, \quad g(x_i) = x_i(1 - x_i), \quad (7)$$

где  $x_i$  – доля предприятий-участников («инновационная активность») процесса в пространстве  $i$ -й технологии;

$D$  – агрегированная величина взаимодействия (информационного и производственного) между предприятиями-участниками процесса ( $D > 0$ );

$M$  – размерность пространства технологий (количество инновационных технологий).

Белый шум  $\zeta_i(t)$  определяется как

$$\langle \zeta_i(t) \rangle = 0, \langle \zeta_i(t) \zeta_j(t') \rangle = \sigma^2 \times \delta_{ij} \times \delta(t - t'). \quad (8)$$

В интерпретации [7] учитываемое влияние случайного процесса выражается через динамику макроскопической (внешней) переменной  $\langle x \rangle = 1/M \sum_i x_i$  и ее стационарного значения  $\langle x \rangle^* = \mu$ . Заменяя  $x_j$  средним значением  $\mu$  и используя стационарную плотность вероятности  $P_{st}(x, \mu)$ , систему уравнений (6–8) при  $M \rightarrow \infty$  можно привести к виду

$$dx/dt = f(x) - D(x - \mu) + g(x) \zeta(t), \quad (9)$$

$$\text{при } \mu = \int_0^1 x P_{st}(x, \mu) dx \equiv \Phi(\mu).$$

Стационарная плотность вероятности  $P_{st}(x, \mu)$  определяется из уравнения Фоккера-Планта

$$P_{st}(x) = Z^{-1} \exp \left\{ \int_0^x dy (f(y) - \right.$$

$$\left. - \sigma^2 / 2 g(y) g'(y) - D(y - \mu) (\sigma^2 / 2 g^2(y))^{-1} \right\}, \quad (10)$$

где  $Z$  – нормированная постоянная

$$Z = \int_0^1 P_{st}(x, \mu) dx;$$

$g'(y)$  – производная.



С использованием уравнений (10) и (9) построены зависимости стационарной плотности вероятности распределения  $P_{st}(x)$  от инновационной активности  $x$  (рис. 1, 2).

Как видно из рисунков, при  $\gamma > 0$  максимальное значение (пик функции), соответствующее в детерминированном уравнении стационарному состоянию, движется в направлении  $x = 1$  по мере увеличения  $\sigma^2$ . Если  $\sigma^2$  превышает пороговое значение  $\sigma_{пор}^2 > 4$ , то на конечном расстоянии от первоначального максимума (вблизи другой границы пространства состояний ( $x = 0$ )) появляется второй пик (рис. 2).

Таким образом, любой переход в рассматриваемой модели инновационного процесса является только шумовым процессом. Экстремумы стационарной плотности вероятности  $P_s(x)$  претерпевают в верхней полуплоскости ( $\gamma, \sigma^2$ ) катастрофу типа сборки с критической точкой (острием) в координатах  $(0, 4)$ . Все переходы в исследуемой модели ( $\gamma = 0, \gamma \neq 0$ ) являются критическими [4].

Приведя начало координат в ноль (сдвиг на  $S$ ) и обозначив переменную  $z = x - 1/2$ , уравнение (7) преобразуем к виду

$$f(z) = -z, g(z) = 1/4 - z^2. \quad (11)$$

Функция  $f(z)$  является нечетной, и экстремальное значение  $\bar{z}$  сдвигается в точку  $\bar{z} = 0$ .

Используя уравнения (6), (8) и (11), получаем следующие выражения:

$$\langle dz/dt \rangle = -\langle z \rangle - \sigma^2 \langle z \rangle (1/4 - z^2) + 3\sigma^2 \mu_2 \langle z \rangle + \sigma^2 \mu_3, \quad (12)$$

или более точно [4]

$$\begin{aligned} d\mu_n / dt = & -Dn\mu_n + \sum_{m=0} n\mu_{n+m-1} / \\ & / m! \left\{ f^{(m)}(\langle z \rangle) + \sigma^2 / 2 [g'(\langle z \rangle)g(\langle z \rangle)]^{(m)} \right\} + \\ & + \sum_{m=0} n(n-1)\mu_{n+m-2} / m! \sigma^2 / 2 [g^2(\langle z \rangle)]^{(m)}, \quad (13) \end{aligned}$$

где  $\mu_0 = 1, \mu_1 = 0$ .

Конкретизируя уравнение (13), например, для момента второго порядка

$$d\mu_2/dt = \sigma^2 (1/4 - \langle z \rangle^2) - 2\mu_2 + \mu_2 \sigma^2 (6\langle z \rangle^2 - 1/2) + \mu_2 \sigma^2 / 2 (12\langle z \rangle^2 - 1) + 3\mu_4 \sigma^2. \quad (14)$$

Поскольку стационарное значение  $\langle \bar{z} \rangle = \bar{\mu}_{2n+1} = 0$ , отклонения  $\varepsilon = \langle z \rangle - \langle \bar{z} \rangle$  из уравнения (12) малы, то оно примет вид

$$d\varepsilon/dt = -(1 + 1/4\sigma^2 - 3\sigma^2 \bar{\mu}_2)\varepsilon + \sigma^2 \varepsilon^3. \quad (15)$$

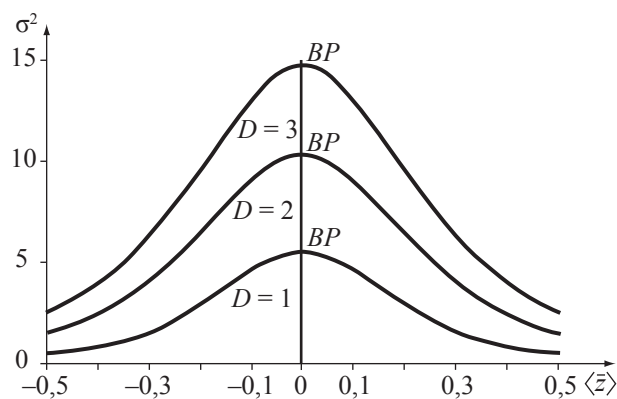


Рис. 3. Зависимость равновесных значений  $\langle \bar{z} \rangle$  от интенсивности шума  $\sigma^2$  при различных значениях параметра взаимодействия  $D$ , где  $BP$  — точка бифуркации типа «вилка»

Тогда условие существования критической точки  $\langle \bar{z} \rangle$  имеет вид

$$1 + \sigma_c^2 / 4 - 3\sigma_c^2 \bar{\mu}_2 = 0. \quad (16)$$

Поэтому критическая точка  $\langle \bar{z} \rangle$  из уравнения (15) является точкой бифуркации типа «вилка» [4]. Критическая точка  $\langle \bar{z} \rangle = 0$  является устойчивой при  $(1 + \sigma_c^2 / 4) > 3\sigma_c^2 \bar{\mu}_2$ . Точно определить критическую интенсивность можно с помощью численных методов анализа уравнений (12) и (14).

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (12–14) является незамкнутой вследствие того, что уравнение (14) содержит момент четвертого порядка  $\mu_4$ . Для того, чтобы замкнуть систему уравнений, используется гауссовская аппроксимация, при которой моментами выше второго порядка пренебрегают. При гауссовской аппроксимации моменты четных порядков выражаются через моменты второго порядка, например,  $\mu_4 = 3\mu_2$ .

Таким образом, в уравнении (12)  $\mu_3 = 0$ , а в уравнении (14)  $\mu_4 = 3\mu_2$ . Бифуркационный анализ системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений (12) и (14) осуществлялся методом продолжения по параметру.

В итоге на рис. 3 получена зависимость равновесных значений  $\langle \bar{z} \rangle$  от интенсивности шума  $\sigma^2$  при различных значениях параметра взаимодействия  $D$ . В критической точке (точке разветвления  $BP$ ) бифуркация типа «вилка».

Для каждой интенсивности шума  $\sigma^2$  существует три равновесных значения  $\langle \bar{z} \rangle$ , одно из которых лежит на линии бифуркационных точек  $BP$  на оси  $\langle \bar{z} \rangle = 0$ , соответствует

минимуму стационарной плотности вероятности и является неустойчивым, а два других – устойчивы и соответствуют максимумам. Видно, что с ростом  $D$  ( $D > 0$ ) критическое значение интенсивности шума  $\sigma_c^2$  также возрастает, что свидетельствует о подавлении шумового эффекта при выполнении условия «инновационной глобализации».

Таким образом, увеличение взаимодействия между участниками инновационного процесса («инновационная глобализация») приводит к подавлению флуктуаций, уменьшению роли случайности в инновационном процессе.

Рассмотрим практическое трактование понятий инновационного процесса при развитии ЭКБ специального назначения.

Описанные выше закономерности, индуцированные мультипликативным «белым шумом» в уравнении (6), характерны только для явления «самоорганизованной критичности» [4]. Это подтверждается наблюдающимся на практике нарастанием инновационных процессов в период замен одних технологий на более совершенные. Бимодальность зависимости стационарной плотности вероятности распределения  $P_{st}(x)$  от инновационной активности  $x$  (рис. 1 и 2) указывает на наличие прерванного равновесия или «перемежаемости», заключающееся в наличии периодов инновационной активности, прерывающих состояние относительного покоя. Явление «перемежаемости» характеризует степень самоорганизации и цикличности инновационных процессов системы, ее способность в «выживании».

Подтверждают проявление «самоорганизованной критичности» системы и степенные законы распределения вероятностей. Статистические характеристики событий имеют плотность вероятности  $p(x) \sim x^{-(1+\theta)}$ , показатель  $\theta$  (0,1) [8]. Очень важно, что подобное степенное распределение характерно именно для инноваций в области научно-исследовательской продукции и разработок изделий.

Таким образом, роль случайности (шума), выраженной в системе доказательств индуцированным гауссовым белым шумом, на практике проявляется в лавинообразном протекании инновационного процесса в точке бифуркации (смене морально устаревших технологий на перспективные). Явления «само-

организованной критичности» системы выражаются в скачках на логистических кривых.

Результаты исследований, полученные путем математического анализа стационарной плотности вероятности распределения случайных величин, дали хорошее совпадение с инженерными бифуркационными исследованиями, подтверждая их по сути.

Следовательно, явление «самоорганизованной критичности», проявляющееся в отраслевой системе в периоды принятия бифуркационных (кризисных) решений, должно интегрировать отличительные свойства явления «инновационной глобализации».

В прикладном плане это значит, что системный подход к управлению инновационными процессами в военной электронике (через аппаратурно-ориентированное и комплексно-целевое планирование, формирование федеральных и отраслевых программ, заказы) в кризисных условиях принятия решений должен предполагать вовлечение в инновации большего количества предприятий-участников разработок, имеющих собственную производственно-технологическую идентификацию.

Важной фазой в определении прикладного характера полученных результатов исследований является их «обкатка» в ретроспективной и перспективной областях (по результатам анализа принятых и вновь предлагаемых управляющих решений в области развития ЭКБ специального назначения).

Остановимся на анализе использования существующих моделей развития электронной отрасли в сложившихся экономических условиях.

Линейная модель инноваций «развитие через рост» предполагает поступательное развитие отрасли и номенклатуры ЭКБ через рост производительных сил. Очевидно, что для современного исторического этапа и на среднесрочную перспективу такая модель управления срабатывает частично, в частных случаях развития технологий и номенклатуры изделий ЭКБ массового производства (например, радиодеталей, радиокомпонентов, пьезоэлектрических приборов и т.п.). Кроме того, такая модель более присуща командно-административной системе управления экономикой.

Нелинейная модель «развитие через спад» соответствует 15-летнему периоду функционирования отрасли и останется актуальной на ближайшую перспективу. Под спадом в широком смысле понимается не только вынужденное сокращение (прекращение, потеря) производства ЭКБ, нестабильность (мелкосерийность) и нахождение производства за пределами страны, но и временные потери в темпах развития из-за кардинального изменения функционального состава номенклатуры ЭКБ, минуя некоторые фазы ее технологического и конструктивного исполнения (переход на функционально сложные аппаратно и системно ориентированные изделия, новые классы изделий, унифицированные и комплексированные электронные модули и базовые конструкции), постепенного перехода на ее применение разработчиками и изготовителями аппаратуры и технических объектов.

Последний из рассмотренных случаев характерен для периода современности (включая ближайшую перспективу) и представляет собой тот вариант спада, который связан с естественной структурной и проектно-технологической перестройкой предприятий, развитием новой межотраслевой сети проектных организаций (дизайн-центров), а также коопераций разработчиков и технологов от различных отраслей при выполнении работ (от материаловедов до разработчиков ЭКБ и образцов радиоэлектронных средств).

Нелинейная модель «недоразвитость через рост» в теории синергетики характеризуется тем, что за внешними признаками развития или выхода из кризиса скрывается накопление консервативных отрицательных тенденций, приводящих с течением времени к количественному и качественному регрессу, либо даже к катастрофе. Всеми чертами этой модели обладает 5–8-летний период вынужденного применения разработчиками и изготовителями аппаратуры специальной техники ЭКБ иностранного производства (ЭКБ ИП) и углубления их технологической и интеллектуальной зависимости от зарубежных интернет-проектов и комплектующих.

Применение ЭКБ ИП придало некоторый положительный импульс развития оборонным предприятиям, в особенности ра-

ботающим на экспорт. Но оно же вызвало необходимость в дополнительных затратах на проведение сертификационных испытаний. Средства, вкладываемые в отбор «коммерческих» или «индустриальных» образцов, сделали их сопоставимыми по цене с изделиями специального назначения, но качество и надежность такой ЭКБ ИП не соответствуют требованиям на специальную технику. Экономия в этом случае мнимая. Поставки в Россию ЭКБ ИП с каждым годом ограничиваются. Риск срыва или невозможности ведения серийного производства из-за непоставок или неожиданного прекращения изготовления ЭКБ ИП резко возрастает. Кроме того, в последнее 10-летие за рубежом активно развивается направление функционально-сложной номенклатуры ЭКБ (например IP-блоки в микроэлектронике), которая изначально аппаратно или системно увязана с конкретными видами и (или) типами аппаратуры, и ее приобретение не имеет смысла.

Специальная электроника попадает в ловушку, поскольку в рациональной погоне за сиюминутными успехами отрасль совершает действия, губительные в долгосрочной перспективе. Это тупиковый путь, который ведет к потере собственных рынков электроники и радиоэлектронных средств специального назначения (внутреннего и внешнего) и выводит на худшую модель – «недоразвитость через упадок».

Нелинейная модель «недоразвитость через упадок» возможна, когда качественный регресс сопровождается количественной деградацией. Это характерно для систем (отраслей), оказавшихся под мощным давлением более сильных и не нашедших сил ответить на «внешний вызов». В теории синергетики такая модель часто сопровождается неудачными попытками реформирования «сверху». В последние 5 лет опасность перехода на эту модель отечественной электронной отрасли потеряла актуальность и перспективу и не имеет возврата, поскольку имеется реальный выход из ситуации по модели «развитие через спад».

Нелинейная модель «развитие через спад» обладает свойствами «самоорганизованной критичности» и «глобализации инноваций», выведенными и математически

доказанными выше. В соответствии с этой моделью разработка типа ЭКБ сопряжена с вовлечением в реальный инновационный процесс большого количества участников, представляющих различные технологии.

Таким образом, теоретически обоснованный и математически описанный метод синергетического моделирования инновационных процессов в отечественной электронике специального назначения обеспечивает доказательную эффективность и практическую значимость принимаемых решений, которая может быть рассмотрена на примере развития изделий субмикронной микроэлектроники в виде заказных СБИС вида «система на кристалле» (СнК).

Современная СБИС СнК поглощает в объеме кристалла блоки и целые стойки аппаратуры специального назначения прежних поколений. Это изделие характеризует не выполнение одной целевой функции (операционного усилителя, компаратора, микропроцессора и т.п.) и даже не совокупности нескольких унитарных целевых функций, а системного функционала, т.е. множества взаимодействующих между собой по заданной (или адаптирующейся) программе детерминированных целевых функций. Другими словами, ЭКБ микроэлектроники нового поколения приобрела системно-аппаратные свойства, стала представлять собой продукт межведомственной кооперации разработчиков и производителей.

Так, при создании изделий сложно-функционально СБИС СнК в процесс проектирования непосредственно включены разработчики аппаратуры (от систем и комплексов до отдельных блоков и модулей), конструкторы СБИС (САПР, топологи, технологи), создатели программного обеспечения и др.

Проектную основу СБИС СнК составляют библиотеки унифицированных сложно-функциональных блоков (СФБ), которые представляют собой объекты интеллектуальной собственности разработчиков (за рубежом – «блоки интеллектуальной собственности» – «IP Cores»). За короткий промежуток времени они получили динамичное развитие от представления в виде отдельных СФБ и описаний интерфейсов к ним – до реализующих эту совокупность «виртуальных компонен-

тов» СнК, многократно используемых при разработке функционально сложных СБИС.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к переходу от проектирования СБИС СнК на основе многократно используемых отдельных универсальных и (или) специализируемых СФБ (блочное проектирование) – к проектированию СБИС СнК (а также микромодулей или микроплат с наборами кристаллов СБИС) на основе многократно используемых «виртуальных компонентов» (платформенное проектирование).

Основное отличие платформенного проектирования от блочного состоит в принципиальной возможности использования групп унифицированных «виртуальных компонентов» в рамках выбранной системной архитектуры.

В ближайшее пятилетие очевидным представляется переход на проектирование и изготовление узлов и блоков радиоэлектронных средств специального назначения на основе унифицированных (на уровне межвидовой и аппаратурной унификации) платформенных архитектур, реализуемых с использованием верифицированных библиотечных «виртуальных компонентов» и субмикронных промышленных технологий. Создадутся реальные условия для развития базовых технологических платформ создания СБИС нового поколения.

Это позволит не только существенно сократить сроки и упростить разработки СБИС СнК, но и повысить вероятность безошибочности их проектирования, поскольку в едином процессе проектирования будут увязаны элементы САПР СБИС и аппаратуры специального назначения.

Типовые признаки, позволяющие определить принадлежность разрабатываемой СБИС к СнК, состоят в том, что разрабатываемый кристалл

– является технологической реализацией законченного элемента аппаратуры, ранее выполняемого на печатных платах или в ином конструктиве, и содержащего корпусные универсальные (микропроцессоры, схемы памяти, аналого-цифровые преобразователи и т.п.) и специализированные заказные и полузаказные микросхемы (базовые матричные кристаллы, программируемые логические интегральные схемы и др.);



– обеспечивает алгоритмическое единство при решении базовых (типовых) радиотехнических задач для крупного аппаратного направления специальной техники (обработка изображений, цифровое телевидение и телевидение высокой четкости, вычислители радиолокационных станций, приемники радиотелефонной связи различных стандартов, навигационные приемники, средства опознавания, разведки, наведения, целеуказания, криптографии и т.д.);

– обеспечивает возможность технологической, схмотехнической и программной модернизации в рамках выбранного платформенного базиса в интересах развития аппаратного направления;

– проектируется с использованием отечественных или зарубежных библиотек унифицированных или специализированных СФБ;

– является проектным продуктом, в котором с целью уменьшения площади эффективной поверхности и межсоединений, потребляемой мощности, сроков разработки проводится рациональное распределение реализации функциональных элементов и узлов архитектуры между аппаратными и программными методами.

Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать стратегию программного развития микроэлектроники специального назначения в виде проекта СнК, который представляет собой сложную аппаратно-программную реализацию элемента аппаратуры в виде системно ориентированной

функционально законченной субмикронной СБИС высокой степени интеграции, проектируемой на системном и кристалльном уровнях с использованием сквозного маршрута САПР «аппаратура–СБИС», включающей в обязательном порядке связанные единым алгоритмом обработки сигнала процессорные элементы, блоки памяти, цифровые и аналоговые узлы.

#### Библиографический список

1. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир. – 1980.
2. Пригожин, И.Р. От существующего к возникающему / И.Р. Пригожин. – М.: Наука. – 1985.
3. Буданов, В.Г. Синергетическое моделирование сложных систем и практическая философия / В.Г. Буданов // Философские науки. – № 5. – 2007. – С. 57–66.
4. Серков, Л.А. Синергетическое моделирование инновационных процессов / Л.А. Серков URL:// <http://www.uni-dubna.ru/kafedr/mazny/sinergy>.
5. Буланчев, В.А. Самоорганизация экономических систем с детерминированным хаосом / В.А. Буланчев, Л.А. Серков // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 4. – С. 116–126.
6. Полтерович, В.М. Диффузия технологий и экономический рост / В.М. Полтерович, А.А. Хенкин. – М.: Наука. – 1988.
7. Гукенхеймер, Дж. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей / Дж. Гукенхеймер, Ф. Холмс. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2002.
8. Малинецкий, Г.Г. Нелинейная динамика. Подходы, результаты, надежды / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.В. Подлазов. – М.: КомКнига. – 2006.
9. W. Horsthemke and R. Lefever. Noise-Induced Transitions. Berlin. – Springer. – 1984.

## К ВОПРОСУ О ПРОЦЕССНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

А.А. БОРИСОВ, *начальник ФГУ «22 ЦНИИИ Минобороны России», канд. тех. наук*

*yutkotov@mgul.ac.ru*

Электронная компонентная база (ЭКБ) включает широкий спектр номенклатуры электрорадиоизделий (ЭРИ) электронной техники, квантовой электроники, электротехники и электроэнергетики от пассивных изделий дискретного построения (резисторов, конденсаторов, присоединительных

устройств и т.п.) до комплексированных по функциям современных изделий активной электроники со сложными электродинамическими системами и создаваемых на принципах интегральных технологий модулей и устройств (монолитных многофункциональных схем СВЧ диапазона, сложнофункци-

ональных изделий микросистемотехники, многоэлементных фотоприемных устройств, структурных лазерных решеток, преобразователей электрической энергии с адаптивными свойствами и др.)

В развитии ЭКБ можно выделить временные этапы, которые целесообразно ассоциировать как структурированные поколения. Предлагается следующая градация поколений ЭКБ (рис. 1). В основу градации положены важнейшие группы ЭКБ и их признаки, определяющие облик поколения, а также набор типов, реализуемый исходя из требуемой номенклатуры ЭРИ, которая включается в ограничительный «Перечень электрорадиоизделий, разрешенных к применению...», и аппаратурно-системная ориентация ЭКБ, обусловленная техническими параметрами, системотехническими и схемотехническими характеристиками создаваемых комплексов вооружения.

Комплексируемые многофункциональные изделия, приборы и устройства, создаваемые, как правило, для каналобразующих частей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и радиоэлектронных средств (РЭС) на принципах интегральных технологий и сверхсложные электронные модули на принципах конструктивно-технологической интеграции отнесены к новому (пятому) поколению ЭКБ и составляют его основу.

По мере обновления поколений ЭКБ формулировалась и реализовывалась через нормативные документы система развития ЭКБ, которая периодически совершенствовалась в зависимости от динамики поколений ЭКБ. Система развития ЭКБ включала важнейшие виды деятельности различных структур, непосредственно определяющих основные направления развития ЭКБ и пути их реализации.

В совокупном (многоэлементном) варианте виды деятельности применительно к управлению созданием и применением ЭКБ для комплектации вооружения и военной техники (ВВТ) представлены на рис. 2. Одновременно с созданием ЭКБ специального (военного) назначения различных поколений формировались и совершенствовались важнейшие принципы и элементы управления

развитием ЭКБ, документируемые в совместную нормативную базу Минобороны России и оборонной промышленности в виде комплексов государственных военных стандартов [1] или руководящих документов.

Таким образом, система развития и поддержания на требуемом уровне технических и эксплуатационных свойств ЭКБ специального назначения, как и РЭА и РЭС в целом, включает совокупность организационных и технических мер (видов деятельности), правил (алгоритмов), методов (способов), а также людских, материально-технических, информационных ресурсов, обеспечивающих рациональное создание функционально полной номенклатуры ЭКБ специального назначения в соответствии с нормативным базисом Минобороны России для комплектования объектов и образцов вооружения и военной техники.

Современная сложная и динамичная рыночная среда, в том числе и применительно к размещению заказов на продукцию специального назначения, возросшие требования к техническому уровню ВВТ, кардинально изменили облик ЭКБ нового поколения, при стремлении к оптимизации расходов материально-технических и финансовых ресурсов, предопределили настоятельную необходимость дальнейшего совершенствования системы управления развитием ЭКБ.

Управление указанной системой включает учет (накопление) базы данных о развитии ЭКБ, обработку и анализ информации в этой области, формирование и внедрение механизмов организации и проведения работ по созданию ЭКБ в соответствии с принятыми алгоритмами по видам деятельности, принятие и реализацию решений по каждому виду деятельности, оценку их эффективности [2].

Сформированная в 70–80-е гг. прошлого столетия структурно-иерархическая модель системы управления развитием ЭКБ являлась эффективной при административно-командной структуре хозяйствования и основывалась, в основном, на директивных указаниях многочисленных структур исполнителям работ при слабом базировании на научно-аргументированной взаимосвязи и взаимообусловленности между элементами системы.

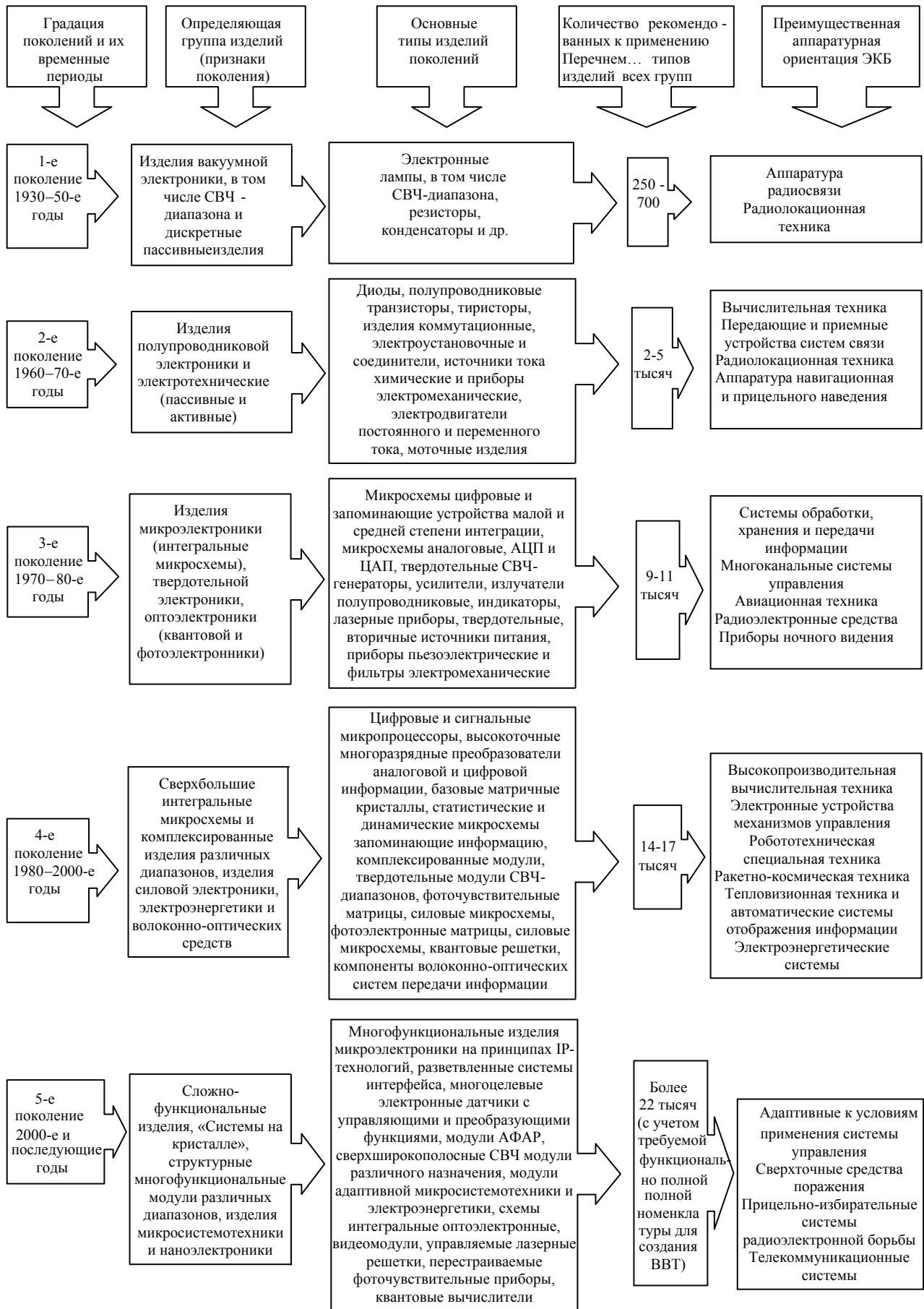


Рис. 1. Поколения развития ЭКБ

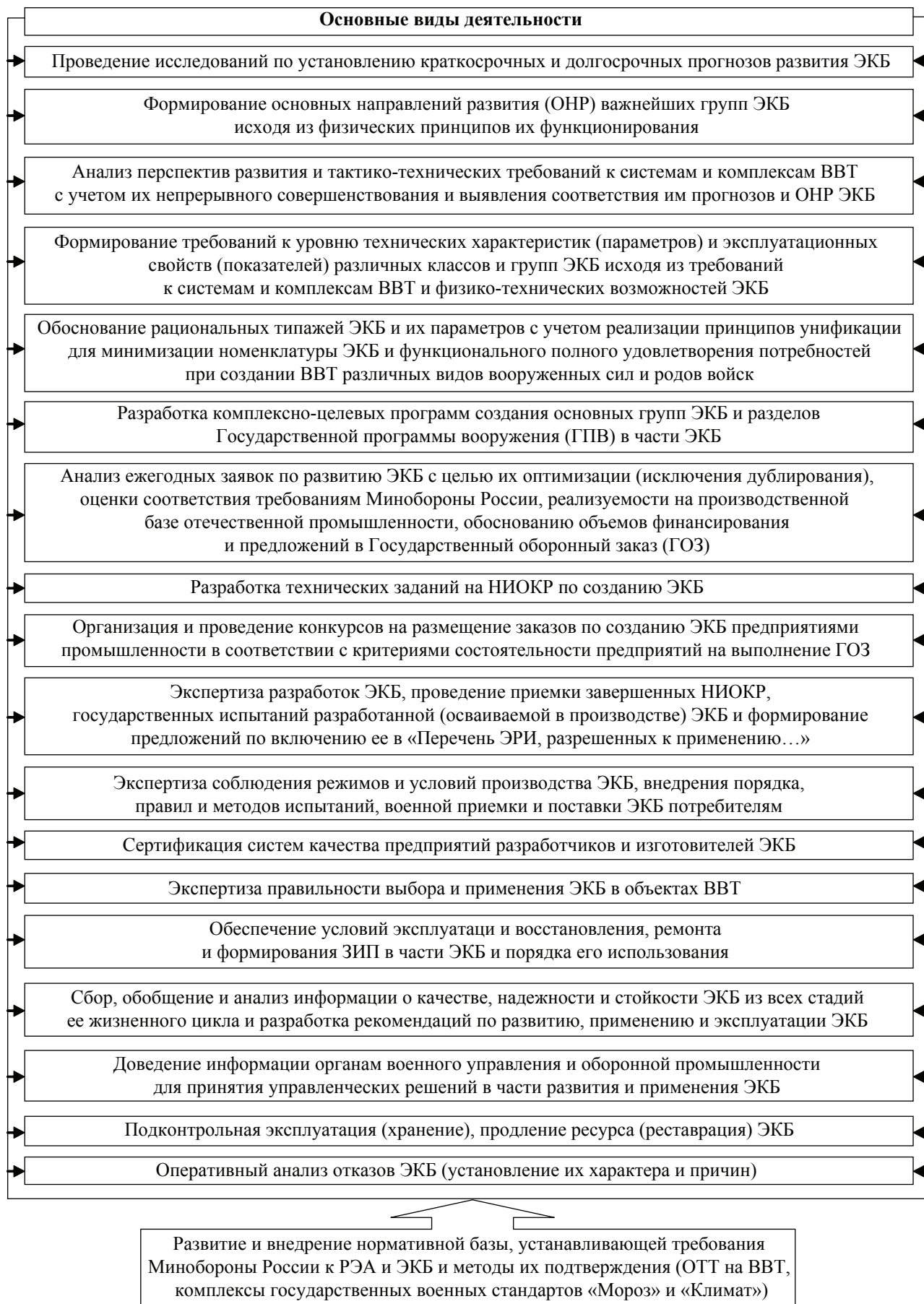


Рис. 2. Перечень важнейших видов деятельности по управлению созданием и применением ЭКБ





Рис. 3. Структура универсальной модели системы управления развитием ЭКБ

В новых условиях хозяйствования, при радикальном изменении облика ЭКБ, возникла настоятельная необходимость развития новой модели управления развитием ЭКБ.

В качестве одного из приемлемых вариантов предлагается процессно-логистическая модель управления, в полной мере учитывающая предпосылки системной автоматизации управления видами деятельности на основе сети информационно-аналитических средств для осуществления управления в реальном времени и возможности использования процедур итерации процессов как инструмента повышения уровня достоверности управления.

Сущность процессно-логистической модели управления развитием ЭКБ сводится к выявлению основных видов деятельности в этой области, трактуемых как основные процессы, их ранжировки для установления строгой взаимосвязи и взаимообусловленности между процессами (выход результатов выполнения предшествующего процесса является входом последующего процесса), что соответствует классическим логистическим прин-

ципам (логике устанавливаемых алгоритмов деятельности) с одновременной ресурсной и информационной поддержкой и документированием видов деятельности по всем стадиям жизненного цикла ЭКБ, оценкой результативности и эффективности процессов и стремлением к непрерывному их улучшению для поиска и реализации оптимальных решений по управлению развитием ЭКБ.

В качестве научно-теоретической базы для такой модели предложено использовать элементы теории системологии, основные принципы и механизм которой применительно к управлению развитием ЭКБ изложены в [3].

В схемно-графическом варианте процессно-логистическая модель управления развитием ЭКБ по аналогии с вариантом, приведенным в [3], представлена на рис. 3.

Представленная на рис. 3 модель системы управления развитием ЭКБ иллюстрирует связь между основными группами (блоками) процессов (формирование и предъявление требований заказчика, установление и проявление ответственности руководства,

управление ресурсами, выявление элементов развития, оценка результативности, повышение эффективности, влияющие на конечную продукцию в виде номенклатуры ЭКБ и параметров изделий, выявление степени удовлетворенности заказчика) и процессами следующего уровня детализации (маркетинга потребностей, формирования основных направлений развития по уровню параметров, пополнения номенклатуры, аргументирования предложений в целевые программы развития основных групп ЭКБ, увязки параметров ЭКБ с РЭС в Государственной программе вооружения и др.).

Введенная в модель логистическая составляющая (логистические процедуры и алгоритмы) включает механизмы рационального использования ресурсов (научного задела, материаловедческой и технологической базы, ресурсов по материально-техническому, профессиональному и финансовому обеспечению работ) развития ЭКБ, реализуемые через программно-целевые принципы развития ЭКБ.

Основным содержанием механизмов логистики применительно к ЭКБ нового поколения также является строгая (в отличие от ЭКБ в россыпи) ориентировка ЭКБ на конечные образцы вооружения через аппаратно ориентированные программы, составляемые конструкторами ВВТ на ранних этапах создания вооружения, и системное изложение (увязка) принципов и результатов развития ЭКБ при реализации комплексно-целевых программ по основным группам ЭКБ, включая достигаемые уровни по параметрам ЭКБ, материаловедческий, конструктивно-технологический, метрологический и другие базы в рамках единой для каждой из групп ЭКБ комплексно-целевой программы.

Процессно-логистический подход управления развитием ЭКБ применим к любому поколению ЭКБ, приведенному на рис. 1. Однако наиболее востребованным такой подход является для пятого поколения ЭКБ, представляющего собой, как указывалось, функционально сложные интегральные схемы, модульные варианты реализации ЭКБ, эквивалентные по выполняемым функциям устройствам и блокам РЭА, построенным на ЭКБ, предшествующих пятому поколению.

Преимущество предложенной модели состоит в непрерывности управления развитием ЭКБ, которое обеспечивается стыковкой отдельных процессов (операций) во всей границе управления, а также комбинацией процессов и их взаимодействием.

При управлении развитием функционально или конструктивно сложной ЭКБ используются информационно ориентированные технические решения на основе универсальных и целевых компьютерных программ и осуществляется постоянная оценка их результативности [4]. Это достигается систематической итерацией (при проектировании функционально сложной ЭКБ специализированными отечественными дизайн-центрами) действий разработчиков ЭКБ и разработчиков финальных образцов радиоэлектронных средств систем и комплексов вооружения и военной техники.

При такой организации работ предложенная модель процессно-логистического подхода к управлению развитием ЭКБ наиболее полно отражает целевую функцию управления – достижение максимальных результатов в части требуемого облика и типизации как для многовариантной неунифицированной ЭКБ, так и для номенклатурного ряда регулярных структур унифицированной ЭКБ перспективных средств вооружения, обеспечение требуемого технического уровня и ориентирует систему менеджмента развития нового поколения ЭКБ на указанные комплексно-целевые варианты построения программ создания ЭКБ.

Основные концептуальные положения построения таких программ применительно ко всем важнейшим группам ЭКБ изложены в [5]. Комплексно-целевое планирование развития ЭКБ зародилось по инициативе органов военного управления и НИО Минобороны в 70-е годы прошлого столетия, начиная с 3-го поколения ЭКБ, и получило наибольшее развитие применительно к ЭКБ пятого поколения. Комплексно-целевому планированию предшествуют прогнозные исследования развития систем и комплексов ВВТ, проводимые при головной роли НИО видов вооруженных сил с участием головных НИИ и КБ промышленности по классам техники.

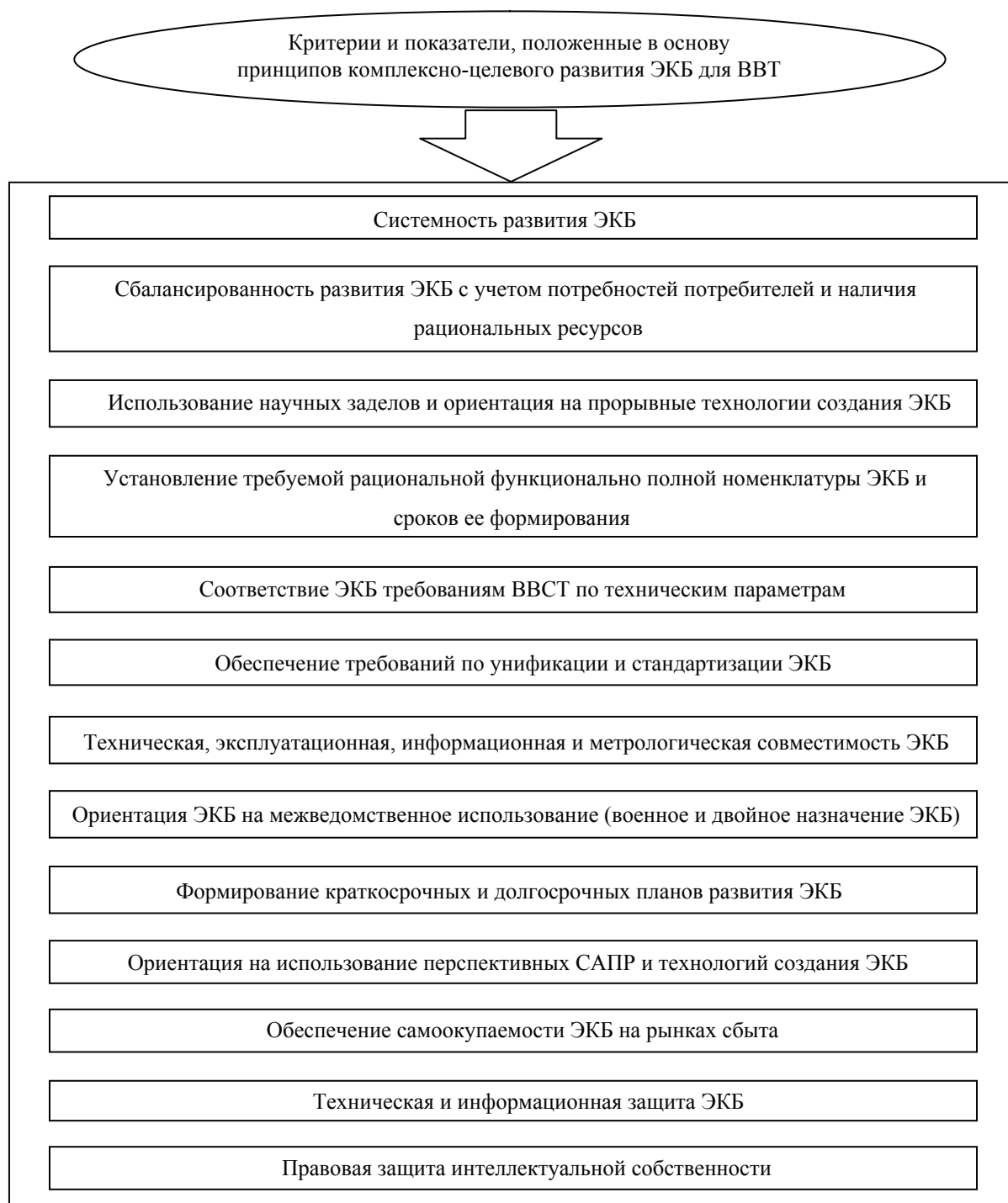


Рис. 4. Основные принципы комплексно-целевого развития ЭКБ

Применительно к ЭКБ прогнозные исследования и формирование основных направлений развития ЭКБ и координация этих видов деятельности осуществляется при головной роли 22 ЦНИИ Минобороны России с участием предприятий оборонной промышленности, создающих ЭКБ, и предприятий, участвующих в проведении единой научно-технической политики в этой области, реализации программ и планов создания ЭКБ.

Основные принципы комплексно-целевого развития ЭКБ для ВВТ представлены на рис. 4.

Основным недостатком на начальном этапе зарождения комплексно-целевого планирования являлась слабая привязка ЭКБ к финальным образцам систем и комплексов ВВТ на ранних стадиях их создания. На конечном этапе создания ВВТ существенные изменения в облике ЭКБ (при их необходи-

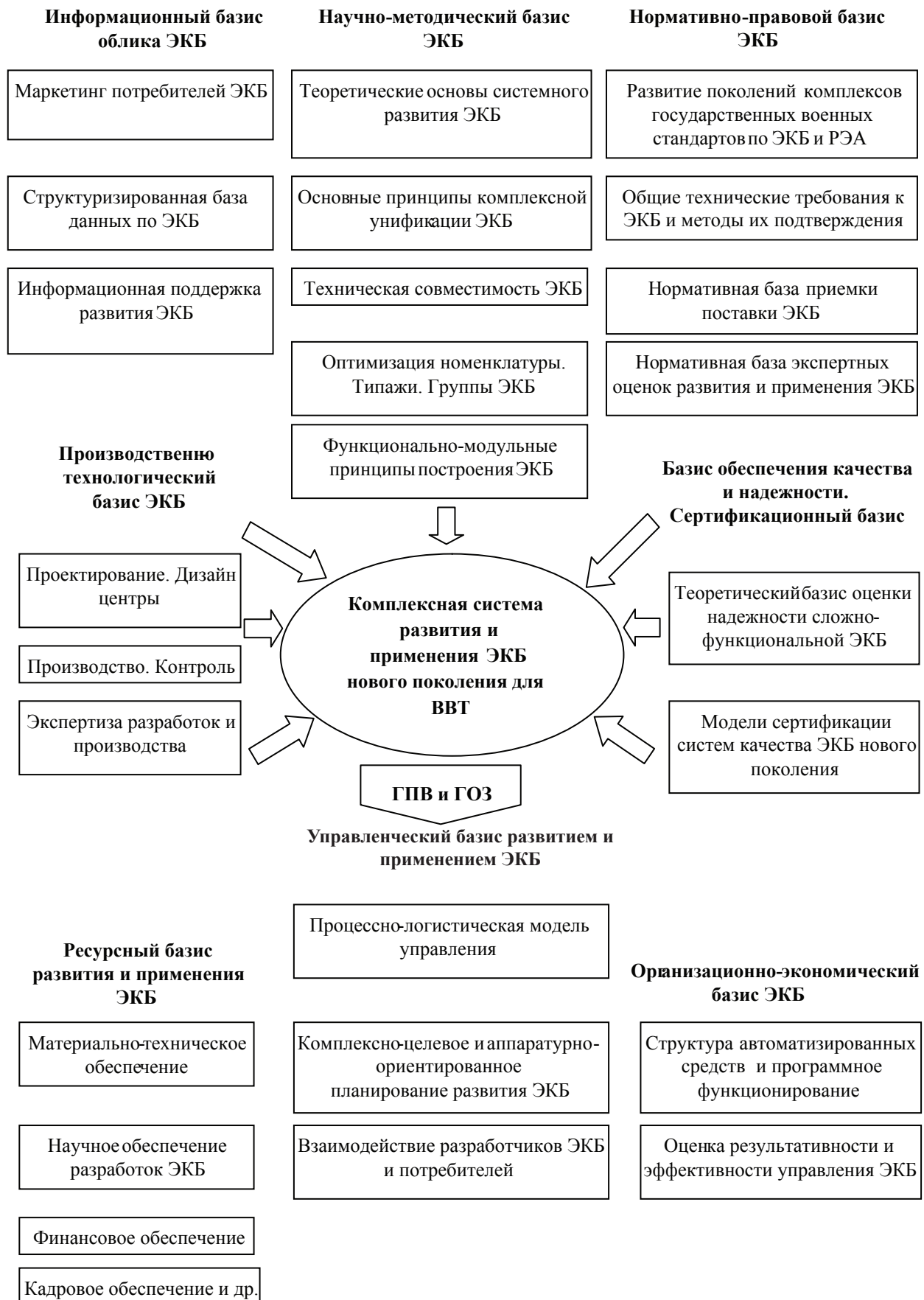


Рис. 5. Обобщенная структура комплексной системы управления развитием и применением ЭКБ нового поколения для ВВТ





Рис. 6. Составление алгоритма процедур результативности управления развитием ЭКБ

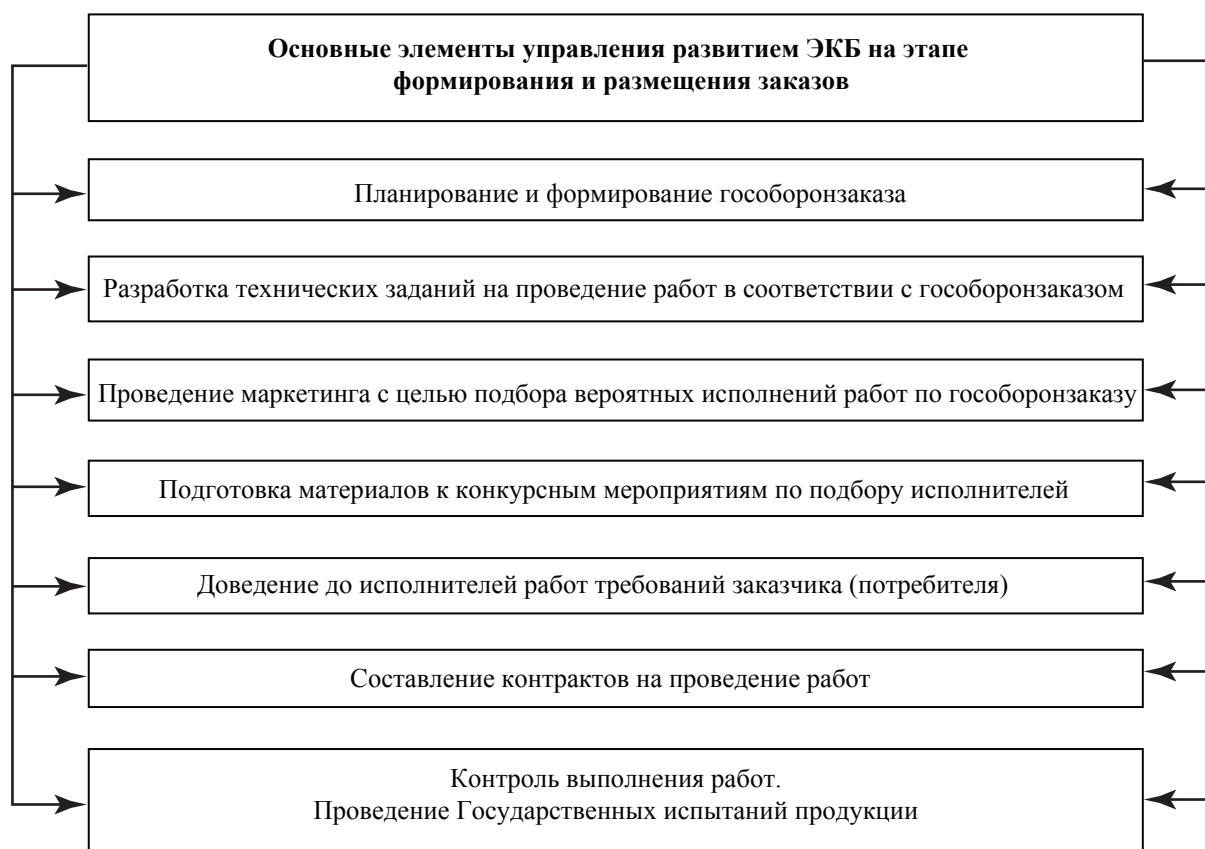


Рис. 7. Перечень основных операций на стадии формирования и размещения заказов по созданию ЭКБ

мости) были крайне затруднительными, дорогостоящими и часто приводили к потере темпов и сроков создания ВВТ.

Представленная модель управления системой развития ЭКБ, основанная на процессно-логистических принципах, подтверждает максимальную заинтересованность заказчиков (потребителей) в оптимизации номенклатуры ЭКБ, определяет (устанавливает) их ведущее место при предъявлении исходных требований к параметрам ЭКБ и выявляет существенную роль при оценке конечных результатов, подтверждающих удовлетворенность заказывающих органов или непосредственных потребителей продукции. Заказчик (потребитель) находится на «старте и финише» управления, то есть при формировании требований к функциональным и эксплуатационным характеристикам и техническому уровню ЭКБ и оценке конечной продукции с правом инспекционного контроля промежуточных процессов, устанавливаемых контрактами и нормативными документами.

Реализация процессно-логистического подхода при управлении развитием и применением ЭКБ нового поколения адаптируется как их алгоритмизация и документированные нормативными документами действия в единой в Министерстве обороны и оборонной промышленности комплексной системе, обобщенная структура которой представлена на рис. 5.

Степень результативности (рис. 6) удовлетворенности заказчика (потребителя) ЭКБ оценивается путем выполнения его требований и обеспечением технических и эксплуатационных характеристик объектов вооружения напрямую (или опосредствованно), зависящих от параметров и эксплуатационных свойств ЭКБ.

Важнейшими являются процессы (операции) на стадии формирования и размещения заказов по созданию ЭКБ (рис. 7).

Эффективное управление процессами развития ЭКБ, принятие рациональных научно обоснованных проектных и производственно-технических решений в этой области возможно только при широком использовании информационных технологий и компьютеризированных средств, аккумулируемых в виде информационно-аналитических систем

с развитой базой данных и базой знаний. Основной построения таких средств являются современные вычислительные и телекоммуникационные устройства и их программное обеспечение, реализующие сбор и обработку, передачу, контролируемый доступ и представленные информации по развитию ЭКБ по указанию (командам) владельца системы.

Применительно к задачам управления развитием ЭКБ в архивах доступа таких информационных средств (или сетей) должна также содержаться информация по основным алгоритмам (процедурам) деятельности, включая базу данных о потребностях в ЭКБ в соответствии с аппаратно ориентированными программами по обеспечению ЭКБ систем и комплексов ВВТ, предусматриваемых к созданию Государственной программы вооружения и гособоронзаказам.

Таким образом, при использовании процессно-логистической модели для управления развитием ЭКБ нового поколения удается осуществить увязку множества, зачастую разнородных по конечному результату и целям блоков (групп) видов действий, представляемых соответствующими базами системы: информационным, научно-методическим, нормативно-правовым, производственно-технологическим, ресурсным, сертификационным, организационно-экономическим и управленческим, а также обеспечить максимальную ориентацию на интересы заказчика (потребителя) ЭКБ.

#### Библиографический список

1. Комплекс государственных военных стандартов «Климат-7» // Госстандарт России. – 1997.
2. Борисов, А.А. Тезисы серии докладов по управлению развитием электронной компонентной базы военного назначения / А.А. Борисов // Труды 22 ЦНИИИ Минобороны России, 2005–2009.
3. Борисов, А.А. Основные положения системологии как вариант научно-теоретического базиса управления развитием электронной компонентной базы нового поколения / А.А. Борисов // Экономика и производство. – 2009. – № 2.
4. Борисов, А.А. Аппаратные и программные средства управления развитием ЭКБ / А.А. Борисов, О.В. Воронков // Экономика и производство. – 2009. – № 3.
5. Борисов, А.А. Основные положения стратегии развития электронной компонентной базы новых поколений и их реализация в комплексно-целевых программах / А.А. Борисов // Экономика и производство. – 2009. – № 2.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ИСПЫТАНИЙ ПОДСИСТЕМ МФКС ПРИ ИЗВЕСТНЫХ ФУНКЦИЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

С.В. ПУШКАРСКИЙ, *НИИ космических систем, канд. техн. наук*

*otmo53@mail.ru*

При создании многофункциональных космических систем (МФКС), состоящих из большого количества подсистем [1] ввиду высокой стоимости и функциональной сложности изделий особое значение имеет оценка точности реализации целевой функции в целом. При этом под оценкой точности понимается определение смещения и дисперсии оценок выходного показателя, обусловленных погрешностями в оценках исходных данных и конечностью числа реализаций.

Такой расчет, как правило, возможен на одной из заключительных стадий создания МФКС, когда основные характеристики средств системы оценены с определенной точностью по результатам различного рода испытаний, математическая модель системы создана и откалибрована [2]. Тогда расчет точности сводится к пересчету ошибок в исходных данных в ошибки выходного показателя. Если характеристики ошибок выходного показателя удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, то вопрос исчерпан. Если нет, то нужно определить дополнительное количество экспериментов (время испытаний) для каждого средства, для того чтобы эти требования удовлетворялись [3]. При этом могут возникать ситуации, когда для некоторых средств при оптимальном распределении требований к точности исходных данных требуется меньше экспериментов (времени испытаний), чем было сделано, а для других – больше.

Дополнительные испытания могут быть проведены, но материальные затраты на лишние испытания уже возратить нельзя. При этом надо учесть, основываясь на опыте создания космических систем, что испытания отдельных подсистем и системы в целом представляют собой весьма трудоемкий процесс и сопряженные с ними материальные затраты значительны. Поэтому планирование испытаний подсистем с целью получения таких точностей исходных данных, при которых

точность выходного показателя удовлетворяет предъявляемым требованиям, актуальная задача и должно осуществляться на одном из ранних этапов создания системы, практически при разработке технических заданий на подсистемы.

Задачу распределения требований к точности оценок входных параметров сформулируем следующим образом: задано требование  $D_0$  на величину дисперсии несмещенной оценки реализации целевой функции  $\hat{\psi}_n$ , т.е.  $D\hat{\psi}_n \leq D_0$  (например,  $D_0 = \Delta_0^2/4t_\gamma^2$ , где  $\Delta_0$  – ширина требуемого доверительного интервала,  $t_\gamma$  – параметр нормального закона уровня  $(1 + \gamma)/2$ ), необходимо предъявить такие требования к величинам дисперсий  $Dc_1^*$ , ...,  $Dc_n^*$  и к величине  $m$  – числу реализаций, чтобы  $D\hat{\psi}_n \leq D_0$  (здесь  $c_1^*$ , ...,  $c_n^*$  – оценки неизвестных входных параметров  $c_1$ , ...,  $c_n$ , определяемые по результатам испытаний системы и отдельных ее подсистем).

Распределение требований к  $Dc_1^*$ , ...,  $Dc_n^*$  зависит, в общем случае, от вида функции распределения  $c_1^*$ , ...,  $c_n^*$ . Однако поскольку характеристики системы должны быть определены с высокой точностью ввиду большой ответственности решаемых ими задач и значительности материальных затрат на их создание, т.е.  $D_0$  должно быть мало. Малость  $D_0$  обеспечивается малыми  $Dc_1^*$ , ...,  $Dc_n^*$ .

В предположении малости  $Dc_1^*$ , ...,  $Dc_n^*$  для  $D\hat{\psi}$  и  $\Delta\hat{\psi}$  используем асимптотические разложения, которые зависят только от моментов центрированных величин  $c_1^* - c_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . При  $m$  конечном в  $D\hat{\psi}$  (и соответственно  $D\hat{\psi}_n$ ) будет входить составляющая из-за конечности числа реализаций, имеющая вид

$$\frac{1}{m(m-1)} \sum_{j=1}^m \left( (\bar{\psi}_j - \frac{1}{m}) \cdot \sum_{j=1}^m \bar{\psi}_j \right)^2.$$

Так как  $Dc_1^*$  должны быть малы, то для определения  $c_1^*$ ,  $i = 1, \dots, n$ , нужно провести достаточно большое число испытаний (или взять достаточно большое время испы-

таний). В этих условиях распределение  $c_1^*$ ,  $i = 1, \dots, n$ , будет приближенно нормальным, т. е. определяться только параметрами  $Mc_i^* = c_i$  и  $Dc_1^*$ , если  $c_1^*, \dots, c_n^*$  независимы; если  $c_1^*, \dots, c_n^*$  зависимы, то в это распределение будут входить еще ковариации  $\text{cov}\{c_i^*, c_j^*\}$ ,  $1 \leq i \neq j \leq n$ . Ковариацию  $\text{cov}\{c_i^*, c_j^*\}$  можно представить в виде

$$\text{cov}\{c_i^*, c_j^*\} = r_{ij} \sqrt{Dc_i^*} \sqrt{Dc_j^*},$$

где  $r_{ij}$  – коэффициент корреляции  $c_i^*$  и  $c_j^*$ .

Так как в асимптотическом разложении используются моменты только центрированных величин  $c_i^* - c_i$ , то в условиях задачи  $D\hat{\Psi}$  зависит только от частных производных

$$a_i, a_{ij}, \dots \text{ и } \sqrt{Dc_i^*}, i = 1, \dots, n.$$

Если в разложении  $D\hat{\Psi}$  ограничиться членами  $j$ -го порядка малости  $\varepsilon$  (в предположении, что  $Dc_i^*$ ,  $i = 1, \dots, n$ , пропорциональны некоторому малому параметру  $\varepsilon$ ), то  $D\hat{\Psi}$  представляет собой полином  $2j$ -й степени от переменных

$$\sqrt{Dc_1^*}, \dots, \sqrt{Dc_n^*}.$$

Это же утверждение справедливо и для  $D\hat{\Psi}_n^{(j)}$ , где  $\hat{\Psi}_n^{(j)}$  – несмещенная с точностью до членов  $j$ -го порядка малости  $\varepsilon$  оценка выходного показателя. Приравнявая  $D\hat{\Psi}$  к  $D_0$ , получаем для определения  $n$  неизвестных  $Dc_1^*, \dots, Dc_n^*$  одно уравнение  $D\hat{\Psi}_n = D_0$ . Чтобы найти недостающие для однозначного решения  $n - 1$  уравнений, можно использовать различные ограничения для конкретных систем, но наиболее целесообразно здесь оптимальное решение, связанное со стоимостным подходом: проведение испытаний связано с материальными затратами и нужно так их организовать, т.е. задать такие  $Dc_1^*, \dots, Dc_n^*$ , чтобы суммарные затраты были минимальны при выполнении условия  $D\hat{\Psi}_n \leq D_0$ .

Для решения этой задачи надо знать функциональные зависимости стоимости испытаний  $G_i$  от дисперсии  $Dc_i^*$  оценки входного параметра, определяемой по этим испытаниям, т.е.  $G_i = G_i(Dc_i^*)$ . Точное определение зависимостей  $G_i(Dc_i^*)$  – сложная технико-экономическая задача, для решения которой необходимы обширные статистические данные. Однако в условиях, когда  $Dc_i^*$ ,

$i = 1, \dots, n$ , малы,  $G_i(Dc_i^*)$  можно разложить в точке  $Dc_i^* = 0$  в асимптотический ряд по степеням  $Dc_i^*$ , т.е.  $G_i(Dc_i^*)$  можно представить в виде

$$G_i(Dc_i^*) = \sum_{j=-d}^{\infty} K_j^{(i)}(Dc_i^*)^j.$$

Учитывая, что  $Dc_i^*$  мало, для задачи распределения требований выражением

$$\sum_{j=1}^{\infty} K_j^{(i)}(Dc_i^*)^j$$

можно пренебречь, члены  $K_0^{(i)}$  не зависят от  $Dc_i^*$  и из суммарного выражения стоимости можно вычесть их сумму

$$\sum_{i=1}^{\infty} K_0^{(i)}.$$

Поэтому достаточно ограничиться выражением

$$G_i(Dc_i^*) = \frac{K_{-d}^{(i)}}{(Dc_i^*)^d} + \dots + \frac{K_{-1}^{(i)}}{Dc_i^*}. \quad (1)$$

Приближенное выражение для  $G_i(Dc_i^*)$  вытекает из следующих соображений: после  $m_i$  испытаний (экспериментов) при их взаимной независимости для  $c_i$  имеем оценку  $c_i^*$  с дисперсией  $Dc_i^* = Dc_{ij}/m_i$ , где  $c_{ij}$  – результат  $j$ -го испытания (эксперимента) для оценки параметра  $c_i$ ; все  $c_{ij}$ ,  $1 \leq j \leq m_i$  имеют одинаковое распределение. Стоимость  $m_i$  испытаний (экспериментов) равна  $G_i(m_i) = G_{1i} m_i$ , где  $G_{1i}$  – стоимость одного испытания (эксперимента). Отсюда  $G_i(Dc_i^*) = K^{(i)}/Dc_i^*$ , где  $K^{(i)} = G_{1i} Dc_{ij}$ .

Таким образом, получаем член  $K_{-1}^{(i)}/Dc_i^*$  в разложении (1). Если эти же этот подход применить для члена  $K_{-2}^{(i)}/(Dc_i^*)^2$ , то можно получить следующее: формула  $Dc_i^* = Dc_{ij}/m_i$  остается без изменений; тогда, чтобы зависимость  $G_i$  от  $Dc_i^*$  была  $K_{-2}^{(i)}/(Dc_i^*)^2$ , нужно, чтобы  $G_i$  было пропорционально квадрату числа испытаний (экспериментов), т.е.  $G_i(m_i) = G_{1i} m_i^2$ . Действительно, определяя  $m_i$  по формуле  $m_i = Dc_{ij}/Dc_i^*$  и подставляя его в вышеприведенное выражение, получаем  $G_i = K_{-2}^{(i)}/(Dc_i^*)^2$ , где  $K_{-2}^{(i)} = G_{1i} (Dc_{ij})^2$ . Из этих же соображений следует, что  $G_i(Dc_i^*)$  будет иметь разложение (1) при условии независимости испытаний, если суммарная стоимость  $G_i$  в зависимости от числа испытаний (экспериментов)  $m_i$  имеет вид

$$G_i(m_i) = G_{1i}^{(d)} m_i^{(d)} + G_{1i}^{(d-1)} m_i^{(d-1)} + \dots + G_{1i}^{(1)} m_i. \quad (2)$$

Тогда

$$K_{-j}^{(i)} = G_{1i}^{(j)} (Dc_{ij})^j.$$



В то же время, для большинства реальных сложных систем и их входных параметров зависимость суммарной стоимости испытаний для определения оценки параметров от их числа может быть представлена в качестве линейной функции. Тогда можно положить, что зависимость стоимости от дисперсии будет

$$G_i(Dc_i^*) = K^{(i)}/Dc_i^*.$$

Стоимость  $m$  реализаций  $G_0(m)$  можно представить в виде

$$G_0(m) = G_{10}(m),$$

где  $G_{10}$  – стоимость одной реализации.

Итак, задача формулируется в следующем виде: надо найти

$$\min[G_0(m) + \sum_{i=1}^n G_i(Dc_i^*)]$$

при ограничении  $D\hat{\Psi}_n \leq D_0$ .

$$m Dc_1^*, \dots, Dc_n^*.$$

Решение сформулированной оптимальной задачи в общем виде имеет весьма сложную структуру. Однако существует частный случай, в котором удастся получить весьма простое аналитическое решение.

В рассмотренном выше случае  $Dc_i^*$  меняется скачками с изменением  $m_i$ . Однако в некоторых случаях  $Dc_i^*$  может меняться непрерывно, например, в случае наиболее распространенного в технике определения оценки интенсивности отказов  $\lambda$  при фиксированном времени испытаний и экспоненциальном распределении времени безотказной работы. Оценка интенсивности отказов  $\lambda^*$  имеет вид

$$\lambda^* = n/T_{IT}$$

где  $n$  – число отказов за интервал времени

$$T_{IT}$$

Дисперсия  $\lambda^*$  равна  $\lambda/T_{IT}$  так как

$$D(\lambda^*) = D(n)/T_{IT}^2,$$

$$D(n) = \lambda T_{IT}$$

Предполагается следующая организация испытаний. Ставится на испытания первый элемент, после его отказа мгновенно ставится второй элемент и т. д., пока не истечет время испытаний  $T_{IT}$ . Число отказов  $n$  в таком случае будет иметь пуассоновское распределение с параметром  $\lambda T_{IT}$ . Подставляя выражение для  $D(n)$  в формулу для  $D(\lambda^*)$ , получаем  $D(\lambda^*) = \lambda/T_{IT}$ . Следовательно,  $D(\lambda^*)$  – непрерывная величина.

Сделаем первое предположение:  $Dc_i^*$  меняется непрерывно (если для некоторых параметров это не так, то можно полученное решение округлить до соответствующего значения, при больших  $m_i$  ошибка будет незначительна).

В качестве оценки показателя возьмем несмещенную с точностью до членов первого порядка малости включительно оценку  $\hat{\Psi}_n^{(1)}$ . Дисперсия такой оценки будет

$$D\hat{\Psi}_n^{(1)} = D\hat{\Psi} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (\bar{\Psi}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{\Psi}_i)^2 + \sum_{i=1}^n a_i^2 Dc_i^* + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_i a_j \text{cov}\{c_i^*, c_j^*\}, \quad (3)$$

при условии, что  $Dc_i^*$  пропорциональные,  $i = 1, \dots, n$ , с точностью до членов  $\epsilon$  первого порядка включительно. Здесь  $\bar{\Psi}_i$  –  $i$ -я реализация моделируемой функции,  $a_i$  – частная производная от показателя по входному параметру  $c_i$ .

$$\text{cov}\{c_i^*, c_j^*\} = M(c_i^* - c_i)(c_j^* - c_j).$$

В (3) первое слагаемое есть составляющая дисперсии за счет конечности числа реализаций, а последующие слагаемые обусловлены случайностью оценок входных параметров.

Сделаем второе предположение: пусть оценки параметров  $c_1^*, \dots, c_n^*$  независимы. Тогда  $D\hat{\Psi}$  можно записать в виде

$$D\hat{\Psi} = \sum_{i=0}^n d_i Dc_i^*,$$

где  $d_i = a_i^2, 1 \leq i \leq n$ ,

$$Dc_0^* = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (\bar{\Psi}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{\Psi}_i)^2.$$

$Dc_0^*$  аналогично первому предположению также можно считать непрерывной величиной. Зависимость стоимости от требуемой точности (дисперсии) в силу вышеизложенного, можно взять в виде  $G_i = K^{(i)}/Dc_i^*$  где  $K^{(i)}$  – константа, равная стоимости одного эксперимента, умноженной на дисперсию результата эксперимента для оценки параметра  $c_i$ ,  $K^{(i)} = G_{1i} Dc_{ij}$  (константа может уточняться в процессе проведения экспериментов).

Итак, задача сводится к следующему: надо найти

$$\min_{Dc_0^*, \dots, Dc_n^*} \sum_{i=0}^n K^{(i)}/Dc_i^*$$

при условии

$$\sum_{i=0}^n d_i Dc_i^* = D_0.$$

Здесь в силу непрерывности  $Dc_i^*$ ,  $i = 0, \dots, n$ , условие  $D\hat{\psi}_n \leq D_0$  можно заменить на  $D\hat{\psi} = D_0$  и  $K^{(0)} = G_{10}Dc_{0j}$ , где  $G_{10}$  – стоимость одной реализации,  $Dc_{0j}$  – дисперсия одного значения моделируемой функции в одной реализации, для  $Dc_{0j}$  оценкой может служить выражение

$$\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{\psi}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{\psi}_i)^2.$$

Решая эту задачу, получим следующую систему уравнений:

$$\sum_{i=0}^n d_i Dc_i^* = D_0, \quad \lambda d_i - \frac{K^{(i)}}{(Dc_i^*)^2} = 0, \quad 0 \leq i \leq n. \quad (4)$$

Отсюда

$$Dc_i^* = (\sqrt{\lambda})^{-1} \sqrt{K^{(i)}/d_i}, \quad i = 0, \dots, n.$$

Подставляя эти выражения в первое уравнение, находим

$$\lambda^{-1/2} = D_0 / \sum_{i=0}^n \sqrt{d_i K^{(i)}}.$$

Следовательно, искомые выражения для дисперсий оценок выходных параметров имеют вид

$$Dc_i^* = D_0 \sqrt{\frac{K^{(i)}}{d_i}} / \sum_{i=0}^n \sqrt{d_i K^{(i)}}, \quad i = 0, \dots, n. \quad (5)$$

При этом суммарные затраты будут

$$\min \sum_{i=0}^n G_i = \frac{1}{D_0} \left( \sum_{i=0}^n \sqrt{d_i K^{(i)}} \right)^2. \quad (6)$$

В дисперсию оценки показателя  $Dc_i^*$  входят с сомножителем  $d_i$  следовательно,

$$d_i Dc_i^* = D_0 \sqrt{d_i K^{(i)}} / \sum_{i=0}^n \sqrt{d_i K^{(i)}}, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (7)$$

Выражение  $d_i Dc_i^*$  можно рассматривать как вклад параметра  $c_i$  (неточности его определения) в суммарную дисперсию,  $d_0 Dc_0^*$  – вклад из-за конечности реализаций  $m$  в суммарную дисперсию. Тогда оптимальное распределение требований к дисперсиям оценок входных параметров характеризуется тем, что вклад  $i$ -го параметра ( $0 \leq i \leq n$ ) пропорционален отношению

$$\sqrt{K^{(i)} d_i} / \sum_{i=0}^n \sqrt{d_i K^{(i)}}$$

или распределение вкладов должно быть в пропорции

$$\sqrt{K^{(0)} d_0} : \sqrt{K^{(1)} d_1} : \dots : \sqrt{K^{(n)} d_n}.$$

Таким образом, распределение требований состоит в том, что требование на суммарную дисперсию  $D_0$  должно быть разбито на слагаемые вклады в пропорции

$$\sigma(c_{0j}) \sqrt{G_{10}} : |a_1| \sigma(c_{1j}) \sqrt{G_{11}} : \dots : |a_n| \sigma(c_{nj}) \sqrt{G_{1n}},$$

(здесь  $\sigma(c_{ij}) = \sqrt{Dc_{ij}}$ ,  $0 \leq i \leq n$ ) в силу того, что  $d_i = a_i^2$ ,  $K^{(i)} = G_{1j} Dc_{ij}$ .

Сделаем анализ подобным образом распределению требований к числу испытаний (экспериментов) для определения оценок каждого параметра. С точностью до соответствующих округлений имеем

$$Dc_{ij} / m_i = D_0 \sqrt{G_{1j} Dc_{ij} / d_i} / \sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i}$$

или

$$m_i = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i}}{D_0} \cdot \sqrt{\frac{G_{1j} Dc_{ij}}{G_{1i}}} = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i}}{D_0} \cdot \frac{|a_i| \sigma(c_{ij})}{\sqrt{G_{1i}}}, \quad (8)$$

$$0 \leq i \leq n, \quad m_0 = m.$$

Требования предъявлены как к числу испытаний (экспериментов) для определения оценок параметров, так и к числу экспериментов (реализаций).

Можно решать и двойственную задачу: задана суммарная стоимость экспериментов  $G$  (стоимость подготовительных работ в нее не входит), какую при этом максимальную точность показателя можно получить и как при этом надо организовать испытания, т.е. надо минимизировать

$$\sum_{i=0}^n d_i Dc_i^*$$

при условии

$$\sum_{i=0}^n K^{(i)} / Dc_i^* = G.$$

Эту задача решается указанным выше методом.

Имеем систему уравнений

$$\sum_{i=0}^n \frac{K^{(i)}}{Dc_i^*} = G, \quad d_i - \lambda K^{(i)} / (Dc_i^*)^2 = 0, \quad 0 \leq i \leq n.$$

Отсюда  $Dc_i^* = \sqrt{\lambda} \sqrt{K^{(i)} / d_i}$ ,  $i = 0, \dots, n$

Подставляя это выражение в первое уравнение, находим

$$\sqrt{\lambda} = \frac{1}{G} \sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i}.$$

Далее определяем выражения для  $Dc_i^*$

$$Dc_i^* = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{K^{(i)}}{d_i}} \sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i}. \quad (9)$$

Выражение

$$\sum_{i=0}^n d_i Dc_i^*$$

при этом будет равно

$$\frac{1}{G} \left( \sum_{i=0}^n \sqrt{K^{(i)} d_i} \right)^2.$$

Если в результате одних и тех же испытаний получают оценки не для одного, а сразу для нескольких параметров, то этот случай также укладывается в рассматриваемую схему. Действительно, пусть при испытаниях объемом  $m_i$  получают независимые оценки  $c_i^*$  и  $c_k^*$  с  $Dc_i^* = Dc_{ij}/m_i$  и  $Dc_k^* = Dc_{kj}/m_i$ . Тогда отношение дисперсий  $Dc_i^*/Dc_k^*$  есть константа  $Dc_{ij}/Dc_{kj}$  в формулу

$$\sum_{i=0}^n d_i Dc_i^*$$

вместо  $Dc_k^*$  можно подставить  $Dc_i^* (Dc_{kj}/Dc_{ij})$ . В результате  $Dc_k^*$  исключается из дальнейшего рассмотрения (в суммарную стоимость также не входит). После получения  $Dc_i^*$  легко определяется  $Dc_k^*$ .

Рассмотрим особенности распределения требований при непрерывном изменении дисперсий исходных данных (в зависимости от времени испытаний). Этот случай имеет место, например, при оценке характеристик надежности средства (подсистемы) по одной достаточно длительной реализации процесса его функционирования.

К примеру, в качестве входных параметров возьмем интенсивности отказов  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$   $n$  подсистем. Времена безотказной работы средств имеют экспоненциальные распределения с этими параметрами. Стоимость испытаний в силу вышесказанного возьмем пропорциональной времени испытаний, т.е.  $G_i = G_{1i} T_i$  где  $G_{1i}$  – стоимость в единицу времени испытаний для оценки  $i$ -го параметра,  $T_i$  – время испытаний для оценки  $i$ -го параметра. Дисперсия оценки  $\lambda_i^*$  параметра  $\lambda_i$  равна  $\lambda_i/T_i$ . Отсюда  $G_i(D\lambda_i^*) = K^{(i)}/D\lambda_i^*$ , где  $K^{(i)} = G_{1i} \lambda_i$ . В результате (5) приобретает вид

$$D\lambda_i^* = \frac{D_0 \sqrt{G_{1i} \lambda_i / d_i}}{\sum_{i=0}^n \sqrt{G_{1i} \lambda_i d_i}}, \quad (10)$$

минимальные суммарные затраты

$$\min \sum_{i=0}^n G_i = \frac{1}{D_0} \left[ \sum_{i=0}^n \sqrt{G_{1i} \lambda_i d_i} \right]^2.$$

Формула дисперсии оценки при этом имеет вид

$$d_i D\lambda_i^* = \frac{D_0 \sqrt{G_{1i} \lambda_i d_i}}{\sum_{i=0}^n \sqrt{G_{1i} \lambda_i d_i}},$$

где вклады каждого параметра должны находиться в пропорции

$$\sigma(c_{0j}) \sqrt{G_{10}} : |a_1| \sqrt{G_{11}} \sqrt{\lambda_1} : \\ : |a_2| \sqrt{G_{12}} \sqrt{\lambda_2} : \dots : |a_n| \sqrt{G_{1n}} \sqrt{\lambda_n},$$

т.е. вместо стоимости одного испытания (эксперимента) сюда входит стоимость испытаний в единицу времени, а вместо дисперсии одного результата испытания для определения оценки параметра – само значение параметра.

Учитывая равенство  $D\lambda_i^* = \lambda_i/T_i$  получаем требование к длительности испытаний по определению оценки  $i$ -го параметра:

$$T_i = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{G_{1i} \lambda_i d_i}}{D_0} \cdot \frac{|a_i| \sqrt{\lambda_i}}{\sqrt{G_{1i}}}. \quad (11)$$

Таким образом, можно построить аналитическое решение задачи оптимального распределения требований к точности исходных данных подсистем для обеспечения требуемой точности целевой функции всей многофункциональной космической системы в целом.

### Библиографический список

1. Мельников, В.А. Многофункциональная космическая система Союзного государства / В.А. Мельников, М.И. Макаров, С.В. Пушкарский. – М., 2007.
2. Бусленко, Н.П. Математическая модель сопряжения элементов в сложной системе / Н.П. Бусленко // Электронная техника. – 1972. – Вып. 1(1).
3. Шаракшане, А.С. Испытания сложных систем / А.С. Шаракшане, И.Г. Железнов. – М.: Высшая школа, 1974.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ОБЪЕКТА НА ВЫХОДНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА

Ю.П. БАТЫРЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук,  
 Н.П. ПОЛУЭКТОВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,  
 В.Н. ХАРЧЕНКО, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,  
 Ю.П. ЦАРЬГОРОДЦЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук

batyrev@mgul.ac.ru

В традиционных вихретоковых датчиках используется метод выделения информации о зазоре от одного параметра – регистрируется влияние изменения импеданса датчика на работу автогенераторной схемы. Импеданс датчика, помимо рабочей частоты и величины зазора до металлического объекта, также зависит от таких свойств объекта, как электропроводность  $\sigma$  и магнитная проницаемость  $\mu$ . В практике проведения измерений зазоров на различных энергоагрегатах часто приходится иметь дело с тем, что поверхности, контролируемые вихретоковыми датчиками, оказываются сделанными из разных металлов или сплавов. Это вызывает необходимость пере-

стройки всего измерительного канала, если он не настроен изначально на данный металл, что вызывает некоторые трудности в использовании вихретоковых датчиков. Поэтому одной из актуальных задач является создание такого измерительного преобразователя, выходные характеристики которого не зависели бы от свойств контролируемого металлического объекта –  $\sigma$  и  $\mu$ . С этой целью были проведены исследования взаимодействия катушки вихретокового датчика с различными металлами на различных частотах. Были измерены активная и реактивная составляющие полного сопротивления датчика наряду с магнитудой и фазой.

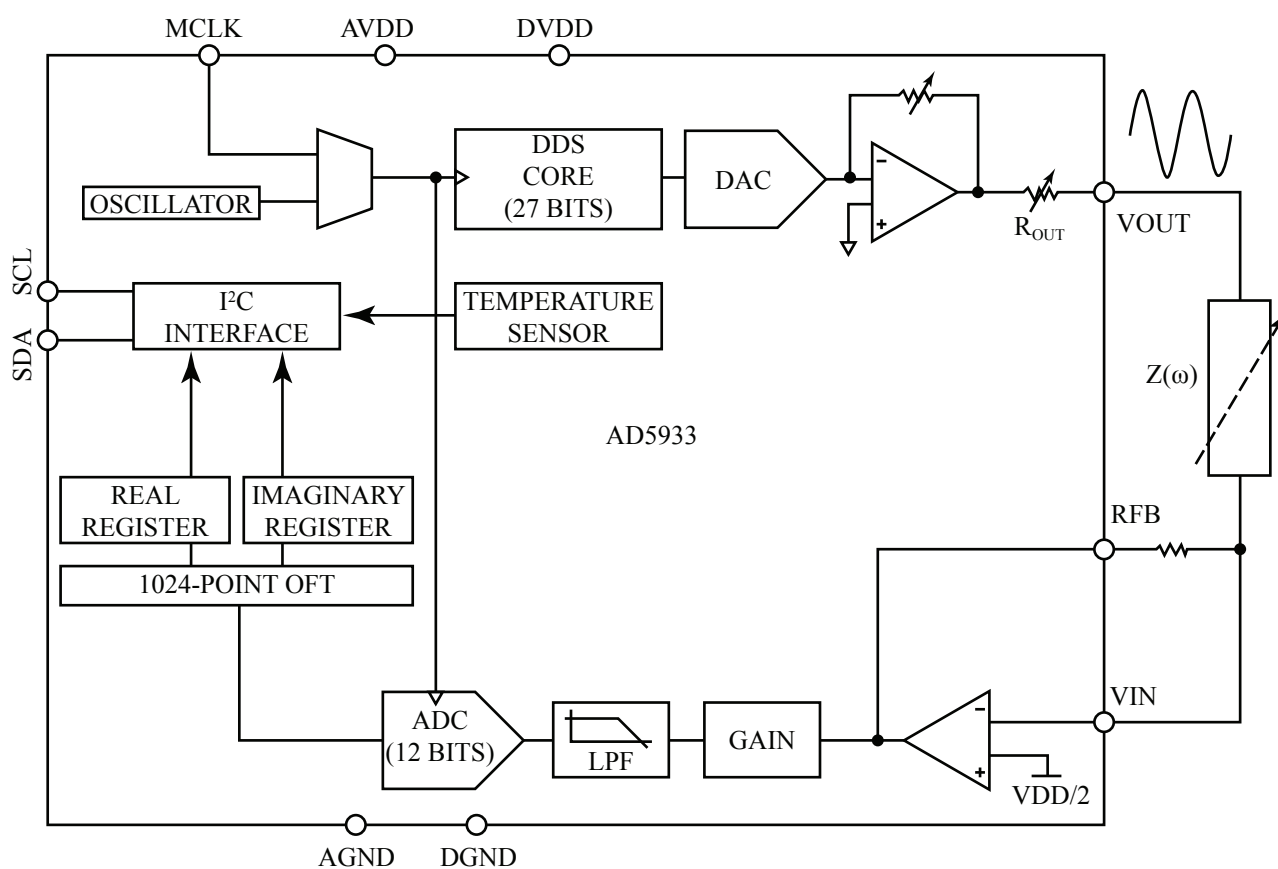


Рис. 1. Схема измерения



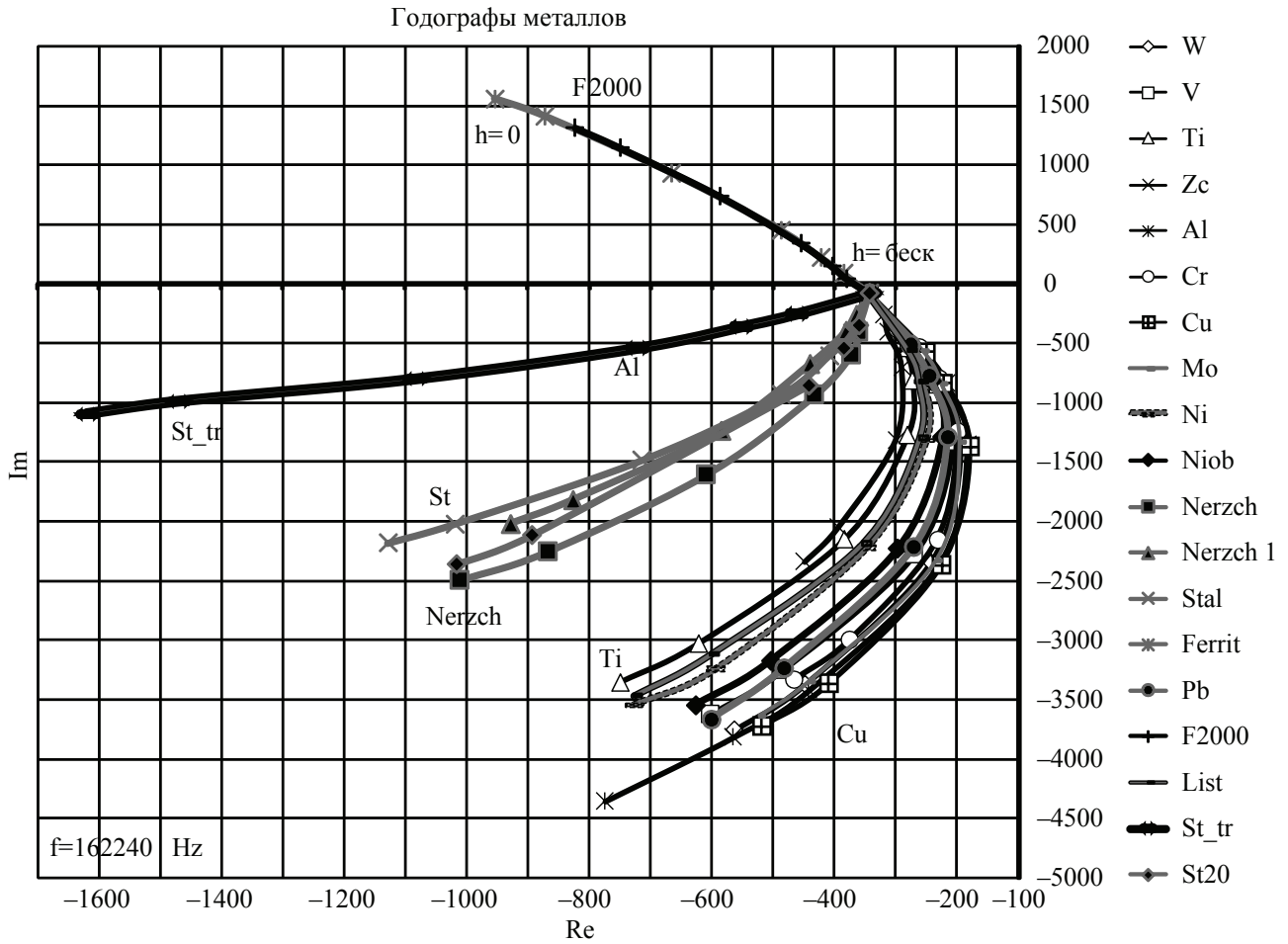


Рис. 2. Годографы металлов

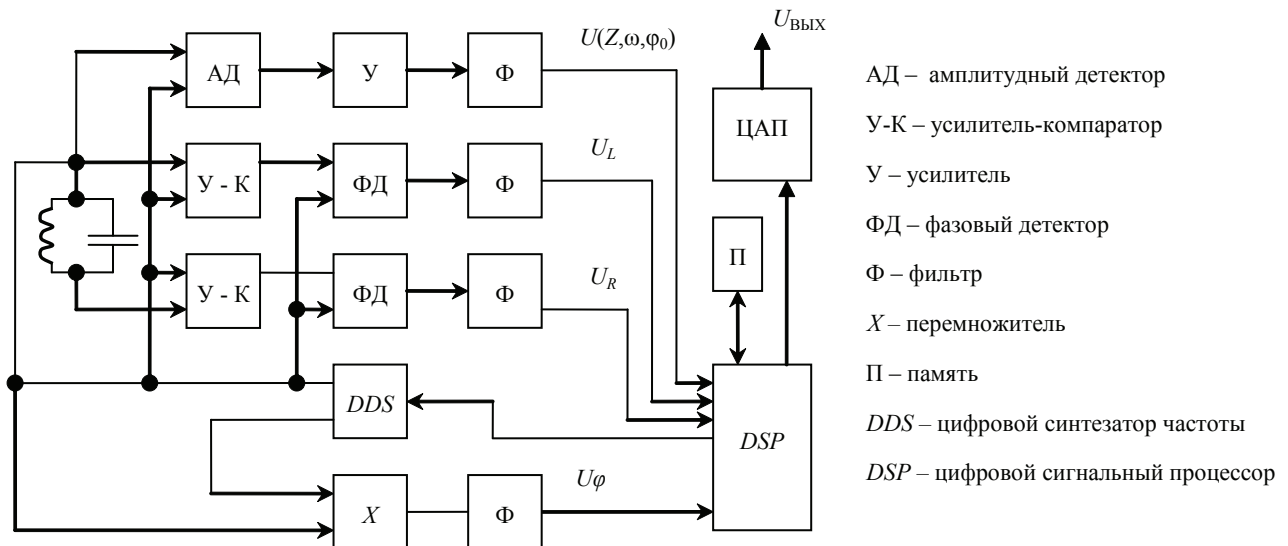


Рис. 3. Структурная схема цифрового устройства

Исследование взаимодействия катушки с различными материалами объектов проводилось с помощью микросхемы фирмы Analog Devices AD5933, которая сочетает в себе прецизионный генератор, используемый для возбуждения датчика, аналого-цифровой

преобразователь и цифровой сигнальный процессор для обработки данных.

Испытания проводились на датчике со следующими параметрами – проволоочная катушка  $\varnothing 52,0$  мм,  $R = 5.1$  Ом,  $L = 450$  мкГн. Рабочая частота в процессе измерений изме-

нялась от 150 кГц до 180 кГц. Схема измерений представлена на рис. 1. Исследуемое сопротивление  $Z$  состояло из последовательно подключенного шунтирующего сопротивления и параллельно подключенных катушки и конденсатора.

В процессе испытаний шунтирующее сопротивление равнялось  $R_g = 620$  Ом, емкость шунтирования катушки  $C_0 = 2$  нФ, при этом резонансная частота датчика была равна  $f_{рез} = 162240$  Гц. Результаты измерений активной и реактивной составляющих для различных материалов образца в зависимости от зазора  $h$  представлены на графике рис. 2 в виде годографов. Из графика хорошо видно, как влияют проводимость и магнитные свойства металла на выходную характеристику. Это позволяет однозначно определить тип контролируемого металла и путем цифровой обработки нормализовать выходную характеристику, делая ее не зависимой от металла.

Как видно из приведенных графиков, каждому типу металла на комплексной плоскости соответствует свой уникальный годограф, отражающий изменение зазора. Из этого факта можно сделать предпосылку к методу обработки сигналов вихретоковых датчиков на основе анализа нескольких параметров с принятием решения о типе контролируемого металла и введением соответствующих поправок на параметры схемы возбуждения.

Для расширения функциональных возможностей измерения зазора предложена

схема цифрового вихретокового преобразователя, представленная на рис. 3.

Микропроцессорное устройство ( $DSP$ ) задает режимы возбуждения датчика, управляя частотой и фазой цифрового синтезатора частоты, гармонический сигнал с которого возбуждает контур вихретокового датчика. Анализируя нормализованные значения активной и реактивной составляющих импеданса датчика, а также амплитуду и фазу выходного сигнала, можно определить тип контролируемого металла и подобрать частоту возбуждения схемы для обеспечения максимальной чувствительности и линейности. При контроле немагнитных металлов путем поддержания постоянным произведения проводимости на частоту можно устранить влияние проводимости, что следует из формулы глубины проникновения вихревых токов

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}},$$

при  $\mu = 1$ . МПУ управления производит взаимный анализ этих характеристик, на основе которого определяется тип металла и вводятся поправочные коэффициенты, определяющие выходную характеристику датчика.

Одновременно такая схема позволяет проводить компенсацию температурной погрешности датчика, вызванную изменением проводимости контролируемого металла от температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №08-08-00455.

## ОЦЕНКА УХОДОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ГИРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ТОЧНОСТИ ПРИВЯЗКИ ЕЕ К ИНЕРЦИАЛЬНОМУ ПРОСТРАНСТВУ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АСТРОДАТЧИКОВ

Б.Б. БЕЛЯЕВ, *ведущий специалист ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина*

*glmnews@geo-nv.ru*

Одной из основных схем построения контура системы управления ориентацией КА в настоящее время является схема, при которой реализация программного положения КА относительно инерциального пространства осуществляется на борту бесплатформенной гироскопической системы

(БГС), построенной на основе показаний гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС).

Измерительная информация, получаемая от ГИВУС, периодически корректируется на основании информации оптических астродатчиков (АД) для привязки программного

положения измерительной системы координат БГС к инерциальному пространству.

Система управления ориентацией осуществляет стабилизацию КА относительно его программного положения, реализованного БГС. Тем самым обеспечивается необходимая ориентация КА в инерциальном пространстве с заданной точностью.

Основными погрешностями ориентации КА, помимо стабилизационных отклонений от программного положения, являются:

- точность привязки измерительной системы координат БГС к инерциальному пространству, обусловленная в основном погрешностью измерений АД;
- погрешность за счет уходов БГС.

Рассмотрим задачу определения скорости ухода измерительной системы БГС относительно измерительной системы АД для последующей компенсации скорости ухода.

Указанная скорость ухода по всем каналам управления принимается постоянной на интервале измерений ( $T_{изм}$ ) и определяется в основном тепловыми деформациями корпуса КА, корпуса АД и нестабильностью измерений ГИВУС.

Кроме того, сделаем естественное предположение, что погрешности измерений АД являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону с нулевым матожиданием и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ .

При сделанных допущениях информацию АД об угле положения КА по одному каналу управления при  $i$ -м измерении можно определить, как

$$\varphi_{изм}^i = \varphi_0 + \Delta^i + WT(i-1) + \varphi_{ст}^i,$$

где  $\varphi_0$  – истинное значение угла;

$\Delta^i$  – погрешность  $i$ -го измерения АД;

$T$  – такт накопления измерений АД;

$W$  – скорость ухода измерительной системы БГС относительно измерительной системы АД;

$\varphi_{ст}^i$  – стабилизационное отклонение КА от его программного положения в измерительной системе координат БГС при  $i$ -м измерении АД.

Проведем суммирование измерений величины  $(\varphi_{изм}^i - \varphi_{ст}^i)$  на интервалах времени

$T_{изм} / 2$  и  $T_{изм}$ . Полученные суммы можно записать в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\varphi_{изм}^i - \varphi_{ст}^i) &= n\varphi_0 + \sum_{i=1}^n \Delta^i + WT \sum_{i=1}^n (i-1) \\ \sum_{i=1}^{2n} (\varphi_{изм}^i - \varphi_{ст}^i) &= 2n\varphi_0 + \sum_{i=1}^n \Delta^i + \\ &+ WT \sum_{i=1}^n (i-1) + \sum_{i=n+1}^{2n} \Delta^i + WT \sum_{i=n+1}^{2n} (i-1), \end{aligned}$$

где  $n$  – число измерений,  $n = T_{изм} / 2T$ .

Исключив из этих двух уравнений неизвестную переменную  $\varphi_0$ , и проделав необходимые преобразования, получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=n+1}^{2n} (\varphi_{изм}^i - \varphi_{ст}^i) - \sum_{i=1}^n (\varphi_{изм}^i - \varphi_{ст}^i) &= \\ &= \sum_{i=n+1}^{2n} \Delta^i - \sum_{i=1}^n \Delta^i + WTn^2. \end{aligned}$$

Анализируя полученное соотношение, необходимо отметить, что разность сумм погрешностей АД (первые два члена в правой части равенства) является, с одной стороны, случайной величиной (обозначаемой далее  $\xi$ ), а с другой стороны, она может использоваться как погрешность оценки величины  $WTn^2$ .

Определим точность оценки скорости ухода  $W$  как  $\varepsilon$ . Тогда можно записать выражение, которое позволяет получить вероятностную оценку точности определения скорости ухода  $W$  (при заданной вероятности  $P_{зАд}$ ), в следующем виде

$$P(|\xi| < \varepsilon WTn^2) = P_{зАд},$$

где

$$\xi = \sum_{i=n+1}^{2n} \Delta^i - \sum_{i=1}^n \Delta^i.$$

Случайная величина  $\xi$  подчиняется нормальному закону распределения, поскольку ее составляющие по определению распределены по нормальному закону.

Определим дисперсию величины  $\xi$ , которая в данном случае может быть представлена в виде

$$D(\xi) = D\left(\sum_{i=n+1}^{2n} \Delta^i\right) + D\left(\sum_{i=1}^n \Delta^i\right) = 2n\sigma^2,$$

где  $D(X)$  – обозначает знак дисперсии случайной величины  $X$ .

Поскольку величина  $\xi$  распределена по нормальному закону, то естественно использовать так называемое правило «трех сигм»,

обеспечивающее вероятность  $P_{3\Delta D} = 0.997$  и получить соотношение

$$3\sqrt{D(\xi)} = \varepsilon W T n^2.$$

После подстановки значения  $D(\xi)$  получим

$$3\sqrt{2}\sigma = \varepsilon W T n \sqrt{n}.$$

Тогда с учетом того, что длительность накопления измерений  $T_{\text{ИЗМ}} = 2nT$ , можно получить окончательное соотношение, связывающее  $T_{\text{ИЗМ}}$  со среднеквадратическим отклонением одного измерения АД, скоростью ухода ГИВУС и требуемой точностью ее определения

$$T_{\text{ИЗМ}}^3 = [12\sigma/\varepsilon W]^2 T.$$

На основании вышеизложенного можно предложить следующую методику определения на борту КА фактической скорости ухода ( $W_\phi$ ) программного положения КА в инерциальном пространстве.

1. Задаем требуемую точность  $\varepsilon$  измерения скорости ухода.

2. Определяем длительность интервала измерений  $T_{\text{ИЗМ}}$  с учетом того, что характеристики АД ( $\sigma$  и  $T$ ) известны. Величина  $W$  принимается равной отклонению среднего значения нулевого сигнала от его паспортного значения для любого запуска ГИВУС ( $W_\Pi$ ).

3. Проводим накопление измерений АД и БГС в течение времени  $T_{\text{ИЗМ}}$ .

4. Определяем фактическую скорость ухода по следующему выражению

$$W_\phi = \frac{1}{Tn^2} \left( \sum_{i=n+1}^{2n} (\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i) - \sum_{i=1}^n (\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i) \right) \pm \varepsilon W_\Pi.$$

После получения величины  $W_\phi$  с заданной точностью  $\varepsilon W_\Pi$  можно определить истинное значение угла  $\varphi_0$  и оценить точность его определения.

При сделанных допущениях информацию об угле положения КА по одному каналу управления при  $i$ -м измерении АД можно определить как

$$\varphi_{\text{ИЗМ}}^i = \varphi_0 + \Delta^i + \varphi_{\text{СТ}}^i + T(W_\phi \pm \varepsilon W_\Pi)(i-1).$$

Проведем статистическую оценку математического ожидания измерений величины  $(\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i)$  на интервале измерений  $T_{\text{ИЗМ}}$ , учитывая, что необходимые суммы уже получены при определении уходов БГС. Эту оценку в данном случае можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} (\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i) = \\ & = \varphi_0 + \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_i + \frac{T}{2n} (W_\phi \pm \varepsilon W_\Pi) \sum_{i=1}^{2n} (i-1). \end{aligned}$$

Из этого уравнения после необходимых преобразований получаем значение  $\varphi_0$  в следующем виде

$$\varphi_0 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} (\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i) - \frac{1}{2} W_\phi T_{\text{ИЗМ}} - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_i - \frac{1}{n} \xi,$$

где  $\xi$  – определенная ранее разность сумм погрешностей АД.

Учитывая, что последние два слагаемых в правой части полученного уравнения являются случайными величинами, их сумма может служить оценкой погрешности определения  $\varphi_0$ .

Определив дисперсию этой суммы и используя «правило трех сигм», погрешность определения  $\varphi_0$  можно представить в виде

$$\Delta\varphi = 3\sigma \sqrt{\frac{5}{2n}} = 3\sigma \sqrt{\frac{5T}{T_{\text{ИЗМ}}}}.$$

Тогда окончательное выражение для определения значения  $\varphi_0$  можно представить в следующем виде

$$\varphi_0 = \frac{T}{T_{\text{ИЗМ}}} \sum_{i=1}^{2n} (\varphi_{\text{ИЗМ}}^i - \varphi_{\text{СТ}}^i) - \frac{1}{2} W_\phi T_{\text{ИЗМ}} \pm \Delta\varphi.$$

Таким образом, получены аналитические соотношения, позволяющие определять, при заданной точности  $\varepsilon$  измерения уходов ГИВУС, время  $T_{\text{ИЗМ}}$  накопления измерительной информации АД и ГИВУС, угол рассогласования между системой координат ГИВУС и инерциальной системой  $\varphi_0$  и оценить погрешность этого угла  $\Delta\varphi$ .

### Библиографический список

1. Венцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М.: Физматгиз, 1958.
2. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1967.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМА СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Б.Б. БЕЛЯЕВ, *ведущий специалист ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина*

*glmnews@geo-nv.ru*

Рассмотрим особенности работы двигателей-маховиков (ДМ) при использовании их в качестве исполнительных органов системы управления в режиме стабилизации. Одна из важных задач, стоящих перед разработчиком системы управления ориентацией космического аппарата (КА), это исследование стационарного установившегося процесса стабилизации, поскольку именно к этому режиму предъявляются основные требования со стороны целевой аппаратуры, в частности – точностные требования.

Поэтому при исследовании динамики установившихся процессов стабилизации КА обычно исключают по возможности все переходные процессы, происходящие в системе до начала установившегося режима. На этот момент необходимо знать начальные условия всех переменных состояния, описывающих угловое движение КА. Важным фактором, влияющим на процесс стабилизации, является вектор начальных скоростей роторов двигателей-маховиков (ДМ). Оказывается, этот вектор нельзя задавать произвольным образом, иначе в системе ДМ возникает переходной процесс, при котором происходит перераспределение величин скоростей ДМ. Это объясняется тем, что размерность системы ДМ (рассматривается пирамидальная компоновка их на корпусе КА) превышает размерность каналов управления КА.

Поэтому при формировании одно-временного управления всеми маховиками возникает возможность перераспределения величин скоростей ДМ на фоне создания необходимых управляющих моментов по трем каналам управления КА для осуществления стабилизации.

Процесс перераспределения скоростей ДМ, при сохранении суммарного кинетического момента системы ДМ, вследствие наличия моментов сопротивления вращению роторов ДМ, зависящих от скорости их вра-

щения, приводит к изменяющемуся по времени возмущающему моменту, действующему на КА, что негативно сказывается на динамике процесса стабилизации.

Причиной возникновения перераспределения скоростей маховиков является то, что механическая система (в данном случае система ДМ) при отсутствии внешних сил (моментов), а при стабилизации приращение количества движения по каналам управления  $\approx 0$ , при наличии диссипации механической энергии стремится к положению, обеспечивающему минимум суммарной кинетической энергии системы [1, 2].

Рассмотрим компоновку ДМ на КА, при которой оси роторов маховиков расположены по ребрам правильной четырехгранной пирамиды. Высота пирамиды совпадает с одной осью КА (в данном случае с осью  $X$ ), а противоположные боковые ребра пирамиды развернуты вокруг  $X$  на угол  $\beta$  относительно плоскостей  $YOX$  и  $ZOX$  связанной системы координат КА. Наклон боковых ребер пирамиды к плоскости  $YOZ$  составляет угол  $\alpha$ .

Уравнения, связывающие проекции суммарного кинетического момента системы ДМ на оси КА со скоростями вращения маховиков, для указанной компоновки имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} J \sin \alpha \cdot (\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4) &= MT_x; \\ J \cos \alpha \cdot (\Omega_1 \cos \beta + \Omega_2 \sin \beta - & \\ - \Omega_3 \cos \beta - \Omega_4 \sin \beta) &= MT_y; \\ J \cos \alpha \cdot (\Omega_1 \sin \beta - \Omega_2 \cos \beta - & \\ - \Omega_3 \sin \beta + \Omega_4 \cos \beta) &= MT_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции ротора ДМ относительно оси вращения;

$\Omega_i$  – скорость вращения ротора  $i$ -го маховика,  $i = 1 \dots 4$ ;

$MT_j$  – соответствующие проекции суммарного кинетического момента,  $j = x, y, z$ ;

$\alpha, \beta$  – компоновочные углы.

Преобразуем систему (1) к виду  $\Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 = MT_x / J \sin \alpha$ ;



Рисунок. Изменение скорости вращения маховика при перераспределении скоростей ДМ

$$\begin{aligned} \Omega_1 - \Omega_3 &= (MT_Y \cos\beta + MT_Z \sin\beta) / J \cos\alpha; \\ \Omega_2 - \Omega_4 &= (MT_Y \sin\beta - MT_Z \cos\beta) / J \cos\alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

Суммарную кинетическую энергию системы ДМ можно представить в виде

$$\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 = 2R^2 / J, \quad (3)$$

где  $R^2$  – кинетическая энергия системы ДМ.

В четырёхмерном ортогональном пространстве (3) представляет сферическую поверхность с центром в начале системы координат и радиусом  $R\sqrt{2}/\sqrt{J}$ .

Подставив  $\Omega_3 = f(\Omega_1)$  и  $\Omega_4 = f(\Omega_2)$ , из последних двух уравнений (2), в первое уравнение (2) и в уравнение кинетической энергии (3), получаем систему

$$\begin{aligned} \Omega_1 + \Omega_2 &= (C + A + B) / 2; \\ (\Omega_1 - A/2)^2 + (\Omega_2 - B/2)^2 &= \\ &= (R^2/J) - (A^2 + B^2) / 4, \end{aligned} \quad (4)$$

где введены следующие обозначения

$$\begin{aligned} A &= (MT_Y \cos\beta + MT_Z \sin\beta) / J \cos\alpha; \\ B &= (MT_Y \sin\beta - MT_Z \cos\beta) / J \cos\alpha; \\ C &= MT_X / J \sin\alpha. \end{aligned}$$

Первое уравнение системы (4) на плоскости  $\Omega_1, \Omega_2$  представляет собой прямую, характеризующую зависимость  $\Omega_1$  от  $\Omega_2$  при условии неизменности проекций суммарного кинетического момента системы ДМ.

Второе уравнение системы (4) на плоскости  $\Omega_1, \Omega_2$  представляет собой окружность с центром  $(A/2, B/2)$  и радиусом, зависящим от кинетической энергии системы ДМ.

Для определения установившегося состояния скоростей ДМ, обеспечивающего минимум кинетической энергии, воспользу-

емся следующим соображением. Величины скоростей  $\Omega_1, \Omega_2$  должны удовлетворять системе (4) и одновременно минимизировать  $R^2$ .

Геометрически это условие обозначает, что радиус окружности должен быть таким, чтобы окружность не пересекала прямую (4), а только касалась ее в одной точке. Это условие эквивалентно прохождению нормали к прямой (4) через центр окружности.

Тогда уравнение нормали к прямой (4) можно записать, как

$$\Omega_1 = \Omega_2 + D. \quad (5)$$

Для определения  $D$  подставим в (5) координаты центра окружности и получим, что

$$D = (A - B)/2. \quad (6)$$

В результате имеем систему двух уравнений, из которых легко находятся искомые значения  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$

$$\Omega_1 + \Omega_2 = (C + A + B)/2. \quad (7)$$

$$\Omega_1 - \Omega_2 = (A - B)/2.$$

Отсюда

$$\Omega_1 = (C + 2A)/4, \quad \Omega_2 = (C + 2B)/4. \quad (8)$$

Теперь, подставив полученные значения  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  во второе и третье уравнения системы (2), определим  $\Omega_3$  и  $\Omega_4$ , которые будут равны

$$\Omega_3 = (C - 2A)/4, \quad \Omega_4 = (C - 2B)/4. \quad (9)$$

Для проверки правильности полученных соотношений было проведено моделирование режима стабилизации КА. На рисунке показано изменение скорости одного из маховиков при перераспределении скоростей ДМ и расчетное значение установившейся скорости этого маховика, полученное по соотношениям (8, 9).

Таким образом показано, что при исследовании установившегося процесса стабилизации углового положения КА, для исключения переходных процессов в работе системы ДМ, начальные угловые скорости вращения маховиков следует задавать вполне определенным образом. Эти начальные скорости маховиков однозначно определяются задаваемым начальным суммарным вектором кинетического момента системы ДМ.

### Библиографический список

1. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики. – Т. 2. / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. М.: Наука, 1983.
2. Айзерман, М.А. Классическая механика / М.А. Айзерман. – М.: Наука, 1974.

## МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ

В.Д. БУРКОВ, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук,*

В.Ф. КРАПИВИН, *проф. МГУЛ, д-р физ.-мат. наук,*

В.С. ШАЛАЕВ, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук,*

Л.Ф. БОРОДИН, *проф. Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им.*

*В.А. Котельникова РАН, д-р техн. наук,*

А.С. МИРОНОВ, *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, канд. техн. наук*

*shalaev@mgul.ac.ru*

Лесной пожар и загорание торфяника, являясь чрезвычайным событием на данной территории, вносит существенные изменения в динамику лесной экосистемы и вызывает тем самым воздействие на региональный климат. Наряду с этим он является стихийным бедствием для населения региона, приносящим большие экономические, а часто и человеческие потери. Поэтому раннее обнаружение очагов загорания леса или торфяного болота и предупреждение об этом событии является актуальной задачей систем мониторинга окружающей среды. Решением возникающих здесь задач занимаются многие исследователи [1–10]. В частности, как следует из ранее опубликованных работ, текущая пожарная опасность леса или лесоболотного комплекса легко может быть оценена на основе данных СВЧ-радиометрии [2, 4, 5, 7]. Поэтому применение в лесопатрульной службе радиометрических комплексов позволяет решить многие задачи обеспечения безопасности населения и сохранения элементов природного и антропогенного ландшафтов. Применение же сенсоров оптического диапазона позволяет лишь картировать очаги пожаров и осуществлять визуальную оценку их масштабности. По рекомендации Бородина и др. [2] последовательность работ, обеспечивающих решение указанных задач, включает следующие этапы:

– создание лабораторий наземного и самолетного базирования, оснащенных микроволновыми радиометрами пассивного зондирования земной поверхности;

– оснащение лесопатрульной авиации сенсорами, позволяющими определять под пологом леса влажность подстилки;

– разработка информационных технологий, ориентированных на выявление очагов возможного загорания и прогнозирование вероятных путей распространения пожара;

– воссоздание объективной картины пожарной, экологической и санитарной обстановки и обоснование путей ее оздоровления.

Таким образом, лесные и торфяные пожары являются особо опасными гидрометеорологическими явлениями, что делает актуальным оперативный поиск и картирование очагов пожаров в сложных метеоусловиях при наличии маскирующего действия дыма. Проблемами первостепенной важности являются задачи своевременной и достоверной оценок пожарной опасности лесных территорий, торфяных болот и штабелей торфа.

Основные экспериментальные данные об СВЧ-характеристиках лесоболотных комплексов в различных гидрологических режимах, торфяных и лесных пожаров были получены в ИРЭ РАН с борта летающих лабораторий и наземных установок в районах Подмосковья, бассейнов рек Енисей, Кеть и Ангара, Назимовского стационара Института леса и древесины (ИЛД) СО РАН [2]. Были получены многочисленные данные, которые доказали, что микроволновые измерения в отличие от оптических наблюдений позволяют рассчитать показатели пожарной опасности залесенных территорий и лесоболотных комплексов, а также заранее обнаружить скрытые очаги загорания штабелей торфа.

В данной работе на основе анализа ранее полученных данных решаются следующие задачи:

1. Разработка эффективной схемы проведения экспериментов по поиску наибо-

лее информативных индикаторов обнаружения очагов загорания под пологом леса или в штабеле торфа.

2. Определение информативных каналов микроволнового диапазона, обеспечивающих высокую надежность диагностики очагов загорания.

3. Распознавание стадий лесного пожара по дистанционным измерениям на основе данных мониторинга лесных пожаров.

### СВЧ-радиометрия в диагностике температурных аномалий на земной поверхности

СВЧ-диапазон является информативной составляющей в многоканальных системах радиофизического мониторинга температурных аномалий, таких как упоминавшиеся выше лесные пожары, а также зоны загорания торфяных болот и штабелей торфа, областей геотермальной активности и др. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что на длинах волн 0,8 и 3,4 см радиояркие контрасты в районах лесных пожаров и пожаров на торфяных болотах и торфоразработках могут достигать величин  $\Delta T_{\text{я}} \in [200, 300]^\circ\text{K}$ . Самое важное обстоятельство то, что СВЧ-диапазон оказывается чувствительным к изменению температуры поверхности, следовательно, обнаружение очагов возможного загорания может быть предупреждающим. В частности, при наблюдениях радиотеплового излучения торфа зафиксировано увеличение интенсивности излучения за счет нагрева от внутренних (глубинных) экзотермических реакций при отсутствии видимых признаков горения.

В общем случае при регистрации собственного излучения поверхности на волнах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  имеем  $\Delta T_{\text{я}} \approx \kappa \cdot \Delta z \cdot dT_{\text{п}}/dz$ , где  $\Delta z = z_2 - z_1$  – разность глубин подповерхностных излучающих слоев ( $z_2 > z_1$ ),  $dT_{\text{п}}/dz = -Q/k_{\text{T}}$ ,  $Q$  – интенсивность теплового потока,  $k_{\text{T}}$  – коэффициент теплопроводности слоя  $\Delta z$ . Чувствительность СВЧ радиометров составляет  $dT_{\text{п}}/d \approx 0,1-1$  градус/м. Это означает, что в сантиметровом диапазоне возможно дистанционное обнаружение зон утечек тепла на линиях теплотрасс и в зданиях.

Важной областью применения СВЧ-радиометрии является также дистанционный

контроль геотермальных источников как при анализе их активности, так и при классификации геофизических структур в зоне их функционирования. В этом случае из-за того, что влажность пород, как правило, незначительна, глубина проникновения электромагнитной волны в грунт увеличивается и равняется обратной величине коэффициента поглощения на единицу глубины  $z$ .

В связи с проблемой изменения климата особую роль в глобальной экоинформатике приобретает мониторинг лесных пожаров. Состояние леса и его влияние на концентрацию парниковых газов важно для достоверной оценки тенденций в изменении окружающей среды. Поэтому глобальная геоинформационная мониторинговая система должна обладать функцией такой оценки. Реальное воплощение такой функции зависит от развития удовлетворительной модели, связывающей состояние лесного массива и его собственное радиотепловое излучение. Создание модели требует изучения характеристик зависимости радиотеплового излучения леса на различных длинах волн от увлажненности лесных горючих материалов, располагающихся слоями. Исследования многих авторов показали, что имеется реальная возможность оценивать пожарную опасность заболоченных и болотных лесов с учетом реального влагосодержания растительного покрова и верхнего слоя почвы, применяя микроволновое зондирование в диапазоне 0,8–20 см. [9]. Многоканальное зондирование позволяет с помощью алгоритмов кластерного анализа решать задачу классификации лесного массива по категориям пожарной зрелости.

Эффективность СВЧ-методов применительно к диагностике лесных пожаров также зависит от детальности описания в модели структуры лесного массива, отражающей состояние кроны и плотность деревьев. Наиболее опасными и трудно обнаруживаемыми являются низовые пожары. В этом случае эффективной является трехслойная модель системы *пламя/дым/крона деревьев*:  $\alpha_p = (1 - \exp\{-\kappa_1\}) \exp(-\kappa_2) \exp(-\kappa_3)$ , где  $\alpha_p$  – излучательная способность очага низового лесного пожара,  $\kappa_i$  – коэффициент ослабления излучения пламенем ( $i = 1$ ), дымом ( $i = 2$ ) и всей толщиной кроны деревьев ( $i = 3$ ).



Коэффициенты ослабления излучения в кроне леса являются функциями типа деревьев. Установлено, что поглощение в кроне сильно растет с уменьшением длины волны. При этом для древостоя большой сомкнутости прием излучения и обнаружение очагов низового лесного пожара представляется затруднительным. Тем не менее, на длинах волн 0,8–1,5 см мониторинг лесного пожара оказывается реализуемым в большинстве случаев. Это связано с тем, что основной вклад в СВЧ-излучение очага пожара вносят частицы пламени размером до 100–300 мкм. В очаге пожара на длине волны 0,8 см приращение радиояркой температуры составляет около 200 °К, что значительно превышает порог чувствительности радиометров. Поэтому микроволновый мониторинг лесного пожара в отличие от оптических методов не зависит от погодных условий.

### СВЧ-радиометрические модели пожаров

Общий случай низового и подземного лесных пожаров моделируется вертикально слоистыми структурами типа «шлейф дыма – полог леса – пламя очага – прогретый приповерхностный слой покрова (подстилка)». Модель верхового пожара – «шлейф дыма – пламя». При этом пламя, шлейф дыма, полог растительности и подстилка интерпретируются как многофазные случайно неоднородные среды, излучающие, поглощающие и рассеивающие СВЧ-радиацию.

Аналитические исследования проводились в предположении, что пламя, дым и кроны деревьев являются четко разделимыми однородными слоями частиц с малыми (по сравнению с длиной волны) размерами и известными температурами и диэлектрическими проницаемостями. Численные расчеты, выполненные с учетом указанных выше ограничений, показывают, что модели очага низового и верхового пожаров приводят к идентичным результатам в смысле наличия максимума коэффициента излучения в диапазоне 0,8–2,25 см. Значение коэффициента излучения (при длине волны, соответствующей экстремуму) в первом случае колеблется в пределах 0,6–0,2, а во втором – в пределах 0,95–0,4. Всего 10–30 % составляет поправка к коэффициенту ослабления в кронах деревьев, если учитывать рассеяния излучения слоем, заполненным тонкими длинными цилиндрами (иглы хвойных деревьев) [8].

Исследование радиотеплового излучения естественных слоев лесных горючих материалов из лишайника, мхов, травяной ветоши, отмершей хвои и кустарников позволили построить методику идентификации параметров лесного пожара при измерении радиотеплового излучения в СВЧ диапазоне электромагнитных волн.

Исследование радиотеплового излучения естественных слоев лесных горючих материалов из лишайника, мхов, травяной ветоши, отмершей хвои и кустарников позволили построить методику идентификации параметров лесного пожара при измерении радиотеплового излучения в СВЧ диапазоне электромагнитных волн.

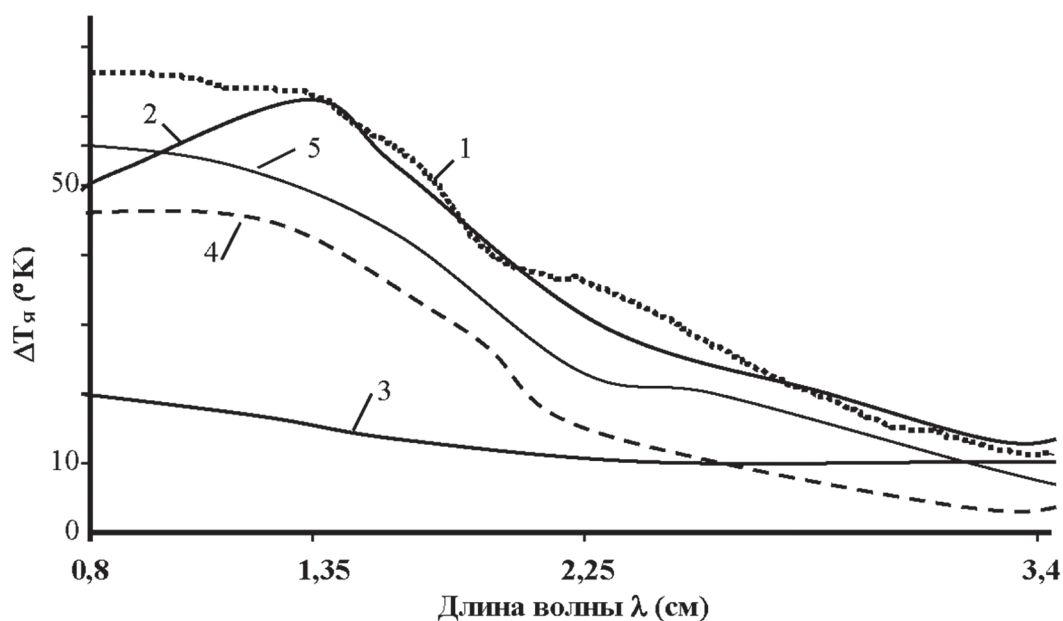


Рис. 1. Усредненный спектр радиоярких контрастов для отдельных элементов лесного пожара: 1 – зона задымления; 2 – фронт; 3 – прогоревшая зона; 4 – тыл; 5 – граница между фронтом и прогоревшей зоной

Сопоставление радиоярких температур на различных длинах волн показало, что излучательная способность лесных пожаров возрастает с уменьшением длины волны и зависит от характера пожара. Приведенные на рис. 1 результаты усреднения зависимостей спектра радиоярких температур для различных элементов лесного пожара от длины волны позволяют достаточно надежно классифицировать эти элементы.

Контроль пожарной опасности лесов на больших территориях требует создания прикладных моделей, описывающих процессы пожарного созревания лесов. Основой для таких моделей, безусловно, является знание зависимости интенсивности радиотеплового излучения элемента лесного ландшафта от его влагосодержания. Наблюдения показывают, что с ростом пожарной зрелости слоев лесных горючих материалов изменяются статистические характеристики полей СВЧ-излучения лесных массивов. В частности, такая зависимость может быть представлена в виде [1]

$$T_{\text{я}} = \kappa(\lambda, w) T_{\text{п}} (1 - \exp\{-\alpha(\lambda, w) h\}) + T_{\text{яп}} \exp\{-\alpha(\lambda, w) h\},$$

где  $\kappa$  – и  $\alpha$  – коэффициенты излучения и поглощения соответственно;

$w$  – влагосодержание среды;

$h$  – толщина излучающего слоя;

$T_{\text{п}}$  – температура почвы;

$T_{\text{яп}}$  – яркостная температура почвы.

В работе [1] предложено следующее решающее правило, основанное на расчете математического ожидания  $M^*$  и стандартного отклонения  $\sigma^*$  для записи  $T_{\text{я}}$  участка лесной территории в диапазоне 2,25 см. Величина  $M^*$  сравнивается с пороговым значением  $d = 7,2514\sigma^* + 249,876$ : если  $M^* \geq d$ , то участок леса обладает средней или более высокой пожарной опасностью; если же  $M^* < d$ , то пожарная опасность на данном участке низкая. Дополнением подобной модели должна быть модель лесного пожара. Примером может служить модель, описывающая лесной пожар как бегущую волну, т.е. как самоподдерживающийся процесс локального высвобождения энергии в активной среде.

Масштаб лесного пожара зависит от множества факторов, таких как содержание

воды в растениях, топография и направление ветра. Запас влаги в растительности является наиболее существенным фактором скорости развития лесного пожара. Maki *et al.* [10] изучили соотношение различных индексов и в лабораторных условиях установили, что перспективными для применения в решении задач предупреждения о возможности лесного пожара являются индекс сухости полога леса VDI (vegetation dryness index), индекс дефицита воды WDI (water deficit index) и нормированный разностный индекс воды NDWI (normalized difference water index).

Для оценки содержания воды в растительности применяются такие показатели, как FMC (fuel moisture content) и EWT (equivalent water thickness)

$$\text{FMC}/100 \% = (\text{FW} - \text{DW})/\text{FW}, \text{ EWT (г/см}^2\text{)} = (\text{FW} - \text{DW})/\sigma,$$

где  $\sigma$  – площадь листьев в пологе (см<sup>2</sup>);

FW – сырой вес растений (г) и DW – сухой вес растений (г).

NDWI, WDI и VDI рассчитываются по формулам

$$\text{NDWI} = (T_{b,NIR} - T_{b,SNIR}) / (T_{b,NIR} + T_{b,SNIR}),$$

$$\text{WDI} = 1 - \Delta_1/\Delta_2, \text{ VDI} = 1 - \Delta_3/\Delta_4,$$

где  $T_{b,NIR}$  – яркостная температура в ближней инфракрасной области;

$T_{b,SNIR}$  – яркостная температура в коротковолновой части инфракрасного спектра;

$\Delta_1$  – расстояние на фазовой плоскости (NDWI, NDVI) между состояниями недостатка (B) и избытка (C) воды в условиях разреженной растительности;

$\Delta_2$  – расстояние между состояниями густой (A) и разреженной (B) растительности при недостатке влаги;

$\Delta_3$  и  $\Delta_4$  – расстояния между измеренными уровнями NDVI и NDWI и между сторонами параллелограмма с вершинами в точках A, B, C и D (плотная растительность и избыток влаги) плоскости (NDWI, NDVI) при NDVI=const соответственно.

NDWI рассчитывается на основе измерений со спутника SPOT в четырех каналах: 430–470 нм, 610–680 нм, 780–890 нм и 1580–1750 нм.

Оценки коэффициентов в зависимостях (1) [10]

Тип растений	$a_{EWT}$	$b_{EWT}$	$a_{FMC}$	$b_{FMC}$
Nerium oleander var.indicum	- 0,10697	0,62268	155,89	-34,09
Betula platyphylla var.japonica	- 0,03136	0,33389	135,59	212,72
Liriodendron tulipifera	- 0,00951	0,17521	68,31	539,65
Другие типы	- 0,02442	0,27963	119,42	204,69

Для оценки NDVI обычно используют показания сенсоров в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, используемых на спутниках типа Landsat [1].

Maki *et al.* [10] предложили линейную аппроксимацию

$$EWT = a_{EWT} + b_{EWT} NDWI, FMC = a_{FMC} + b_{FMC} NDWI, \quad (1)$$

коэффициенты которой определены в таблице для некоторых типов растений.

### Пожарная опасность лесов

Оценки гидрологических параметров элементов лесоболотных ландшафтов с помощью аэрокосмических СВЧ-радиометрических приборов основываются на прямой зависимости интенсивности радиотеплового излучения соответствующих участков подстилающей поверхности от уровня грунтовых вод, влажности почвогрунта и напочвенного покрова. Решение обратных задач осложняется экранирующими свойствами древесно-кустарниковой растительности.

В СВЧ-диапазоне радиояркость сухого густого леса близка к термодинамической температуре воздуха на уровне крон деревьев, а излучательная способность мало отличается от коэффициента излучения абсолютно черного тела.

Зависимости параметров радиотеплового поля открытых лесных участков (поляны, гари) от объемной влажности их приповерхностного слоя совпадают с аналогичными зависимостями соответствующих почвогрунтов. Напомним, изменение влажности почвогрунтов на один процент приводит к изменению радиояркости на 2–3 °К практически безотносительно к типу и плотности грунта, при этом показания СВЧ-радиометра определяются средним (в пределах пятна антенны) значением влажности. Вклад в СВЧ излучение земных покровов грунтовых вод, сосре-

доточенных на глубине 0,4–1м, пропорционален длине волны и оценивается величиной 10–20°К [7].

Интенсивность излучения открытых участков заболоченного леса зависит от типа покрова и совпадает либо с радиояркостью переувлажненных почвогрунтов, либо торфяных болот, либо, наконец, водоемов (редкий подтопленный лес). Экспериментальные исследования показали, что при наблюдении в надир экранирующие возможности древесно-кустарниковой растительности высотой 30–50 см незначительны (интенсивность восходящего излучения покрова изменяется не более чем на 10–20 %). Густая растительность высотой 1,5–2 м практически полностью экранирует излучение почвы в сантиметровом диапазоне и изменяет на 20–40 % радиояркость в дециметровом диапазоне [7]. При СВЧ-измерениях с углами визирования, отличными от вертикального, экранирующие возможности растительного покрова существенно возрастают.

Таким образом, три контрастообразующих элемента определяют основные особенности радиотеплового «рельефа» лесных угодий:

- 1) ствол и густая часть кроны, коэффициент излучения этих частей древесно-кустарниковой растительности близок к 0,94–0,98;
- 2) открытые участки леса и просветы между деревьями, коэффициент излучения здесь варьирует от 0,35–0,37 (вода) до 0,92–0,94 (сухой грунт);
- 3) «полупрозрачная» кромка кроны древесно-кустарниковой растительности, коэффициент излучения этой части древостоя занимает промежуточные значения между характеристикой излучения подстилающего покрова и величиной 0,98.

Из сказанного выше следует, что в общем случае «разрез» радиотеплового поля лесного массива можно интерпретировать как

случайный процесс с импульсными изменениями текущего среднего значения «почти однородного» основного фона (наиболее густая часть крон деревьев). При этом форма импульсов близка к трапециям, основания которых и их средние линии определяются размерами сечений открытых участков леса и просветов между деревьями. Высота каждой «трапеции» несет информацию о влажности подстилающего покрова, а наклоны «непараллельных сторон» определяют экранирующую способность (плотность) полупрозрачной кромки крон деревьев. Заметим, что квазистационарные отрезки (КС-отрезки) радиояркости между концом и началом соседних импульсов являются следствием «однородности» соответствующего участка лесного массива, выражающейся в «почти» одинаковой плотности крон деревьев и малых размерах (по отношению к размерам «пятна» антенны) просветов между ними.

Степень увлажнения проводников горения рассчитывается на базе оценок коэффициента излучения покровов открытых участков леса и под пологом древостоя, а оценки коэффициента излучения, в свою очередь, определяются путем совместного и раздельного анализа параметров КС-отрезков и импульсной составляющей выходного сигнала бортового радиометра, статистические особенности которых обусловлены последовательным усреднением (в пределах «пятна» антенны) пространственно-протяженных участков радиотеплового поля лесного массива. При этом достаточно эффективным является алгоритм рандомизированной линейно-ломаной аппроксимации [6].

В теоретическом плане задачи такого рода наиболее просто решаются для радиометров диапазона 0,8–2 см и случая, когда постоянная интегрирования приборов и время перемещения самолета на расстояние, равное размеру «пятна» антенны, существенно меньше времени пролета среднего значения открытых участков леса и просветов между деревьями. Для такой ситуации «разрез» радиотеплового поля лесного массива можно рассматривать как последовательность разновеликих КС-отрезков, перемежающихся с прямоугольными импульсами, длительность и амплитуда которых являются независимыми случайными величинами.

Средние значения коэффициентов излучения «почти однородного» фона леса (среднее КС-отрезков) и покровов открытых участков лесного массива (среднее амплитуды импульсов), равно как и средний размер просветов между деревьями (среднее значение длительности импульсов) определяются путем совместного решения трех уравнений, связывающих указанные средние величины с текущими параметрами исследуемого участка радиотеплового поля: средним значением коэффициента излучения, средним модуля вариаций его мгновенных значений и, наконец, величиной разности средних значений «положительных» и «отрицательных» выбросов коэффициента излучения.

Другой подход основан на экспериментальных результатах сезонных исследований изменений статистических свойств пространственных вариаций интенсивности собственного СВЧ-излучения лесной территории на различных стадиях пожарной опасности [1,7]. При этом наряду со средними значениями радиояркости учитываются и среднеквадратичные вариации, характеризующие «пестроту» разреза радиотеплового поля лесного массива. Использование этих и других статистических параметров излучения леса в виде отношений, определенным образом нормированных, (типа «шум» / «сигнал») или линейных комбинаций (типа «сигнал» + «вариации») дает возможность более надежно выявить структуру радиотеплового рельефа подстилающего покрова и связать его текущие особенности с классами горимости по Нестерову [6] для каждого участка местности в данный момент времени.

Радиотепловая карта лесоболотных ландшафтов, построенная на основе указанных методик, является (по своей сути) картой оценок влажности приповерхностного слоя покровов на открытых участках леса и под пологом древостоя, что позволяет определять соответствующие им прогнозные оценки класса горимости по Нестерову [6], выбирать оптимальные маршруты и сроки авиатрулирования (очередной радиотепловой съемки) с целью контроля пожароопасных участков леса и наиболее вероятных направлений распространения гипотетических и возник-



ших лесных пожаров, а также оценивать состояние естественных преград на путях их перемещения.

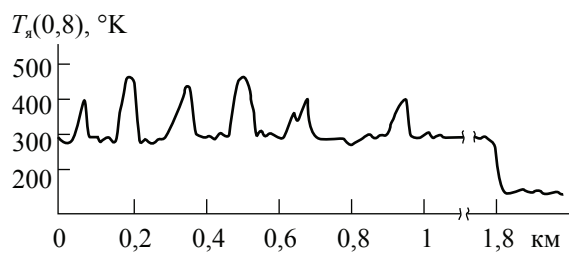
Достоверность и точность прогноза пожарной опасности существенно связаны с уровнем собственных шумов радиометрического приемника и случайными изменениями размеров и местоположения «пятна» антенны, обусловленных не учитываемыми эволюциями самолета.

### Экспериментальные результаты оценки пожарной опасности

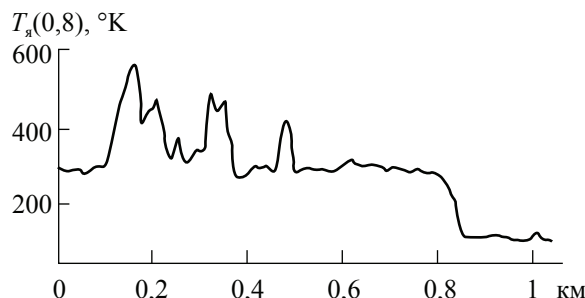
На рис. 2 показаны профили радиояркостной температуры, зафиксированные на борту Ил-14 с помощью радиометра диапазона 0,8 см при исследовании прикрытых густым дымом горящих штабелей торфа, торфяного болота и лесного пожара на торфянике (район г. Шатуры, август–сентябрь 1972 г.). Приращение радиояркости в первом случае составило 100–200°K, во втором 100–300°K и в третьем 30–70°K, что заметно превышает вариации фонового излучения лесоболотных комплексов (5–20°K) и собственных шумов аппаратуры.

По сравнению со спектрами радиояркости иных почвогрунтов в спектре радиотеплового поля торфяников имеет место аномальное снижение коэффициента излучения в диапазоне длин волн 10–20 см и существенное увеличение коэффициента поглощения в том же диапазоне. Эти факты, подтвержденные многочисленными самолетными, наземными и лабораторными измерениями [5,7], являются следствием капиллярно-пористой комковатой структуры торфа с резкими различиями объемных и диэлектрических характеристик частиц, в пространстве между которыми содержится большое количество связанной воды и воздуха.

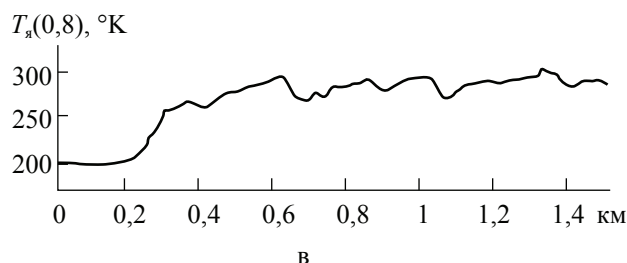
Радиофизические свойства торфяников в достаточно хорошем приближении отображаются моделью случайно-неоднородной среды, построенной в рамках теории лучистого переноса и однократного учета рассеяния [5, 7]. Выявлена близость значений радиуса корреляции неоднородностей диэлектрической проницаемости модели и наиболее вероятного размера частиц торфа [7].



а



б



в

Рис. 2. Профили радиояркостной температуры на волне 0,8 см, полученные при полетах: а – над караваном горящих штабелей торфа; б – над дымящим торфяным болотом; в – над лесным пожаром на торфянике. Уровни 150 К – радиояркость водной поверхности

### Температурно-влажностные параметры торфа

В ходе натурных работ и обработки их результатов установлено [8], что по СВЧ-спектральным характеристикам различимы три группы участков штабелей торфа с разными температурами внутреннего разогрева. Прежде всего это ординарные участки с температурой 20–55 °С, не имеющие глубинных температурных аномалий. Значение влажности по глубине под поверхностью здесь колеблется от 40 % до 60 %. Показатель преломления при этом меняется от 1,5 до 3.

В процессе развития саморазогревания при повышении температуры торфа до 60–75 °С происходит интенсивный перенос влаги из разогретой области очага к более холодной поверхности. Влага конденсируется в мелких порах и капиллярах торфа, увеличивая как среднюю величину (до 4,5), так

и дисперсию пространственных флуктуаций показателя преломления. Ухудшение притока кислорода внутрь штабеля препятствует на некоторое время дальнейшему подъему температуры, и она колеблется около 65–75 °С. В тех случаях, когда влага имеет возможность испаряться через поверхность штабеля, удаление ее сверх определенного уровня вновь облегчает поступление кислорода к очагу и способствует дальнейшему росту температуры. Этот процесс, в свою очередь, ускоряет уход влаги из зоны очага и т. д.

Спектральные характеристики участков, содержащих очаги с подповерхностной температурой 60–75 °С, отличаются усилением аномального эффекта и смещением области его проявления в сторону более длинных волн, а с температурой свыше 75 °С – более высоким средним значением радиояркости в дециметровых диапазоне. На рис. 3 представлены спектры радиояркости холодного и прогретого участков штабеля торфа [5].

Отмеченные свойства отображений данных радиотепловой съемки могут служить основой бесконтактных методов индикации температурных и влажностных характеристик торфа, наличия очагов саморазогрева в штабелях [7].

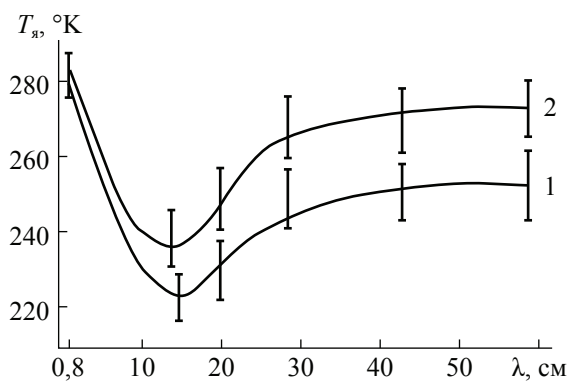


Рис. 3. Спектральные зависимости радиояркостной температуры холодного (1) и прогретого (2) участков штабеля торфа: сплошные кривые – результаты расчета, вертикальная черта – экспериментальные данные

Для оценки влагосодержания проводников горения и условий возникновения подземных и торфяных пожаров используются как косвенные методы, связанные с анализом данных наземных измерений и метеостанций за определенный период времени, так и ме-

тоды непосредственной оценки влажности подстилки и влагозапаса болот (уровня грунтовых вод), основанные на анализе характеристик интенсивности восходящего излучения лесоболотных участков.

При критическом влагосодержании (менее 25 %) отмершей растительности, мхов, лишайников и других проводников горения лесной подстилки создаются благоприятные условия для возникновения и распространения низового пожара. Одновременно, при влажности крон деревьев менее 80 %, возникает серьезная угроза перехода низового пожара в верховой, который является наиболее опасным как с точки зрения скорости распространения пожара, так и с точки зрения уничтожения лесной флоры и фауны.

Для устойчивых низовых пожаров характерные вариации термодинамической температуры пламени по контуру пожара составляют 800–900 °К, а приращение температуры напочвенного покрова и приповерхностного слоя почвы на выгоревшем участке пожара равно 30–80 °К и 10–25 °К соответственно. Максимальная высота пламени фронта пожара 1–2 м и достигает 0,3–0,6 м на флангах и в тылу. Ширина интенсивно горящей кромки по контуру пожара колеблется в пределах 1–3 м. Скорость распространения фронта пожара 1–2 м/мин, флангов 0,6–1 м/мин, наконец, скорость перемещения тыла пожара лежит в пределах 0,2–0,6 м/мин.

### Заключение

Сравнение оптического и микроволнового диапазонов показывает, что в оптическом диапазоне возможно ограниченное наблюдение уже идущего лесного пожара, а в случае с торфяниками – регистрация факта открытого горения или задымления. При этом сенсоры оптического диапазона не позволяют четко разграничить зону лесного пожара из-за задымления большой территории. В отличие от сенсоров оптического диапазона сенсоры микроволнового диапазона могут не только четко оконтуривать территорию пожара, но давать информацию о его состоянии с выделением его зон. Микроволновые радиометры также позволяют получать информацию о влажности подстилки и содержании влаги в пологе леса, что позволяет определять уровень

пожарной опасности данной территории и тем самым предотвращать пожар. В случае с торфяниками микроволновые измерения позволяют выявлять скрытые и явно не проявляющиеся в данный момент очаги загорания торфа.

Микроволновые измерения в зонах возможного загорания леса или торфяников поставляют данные, использование которых в различных алгоритмах позволяет перейти к поиску эффективных критериев оценки пожарной опасности лесных и лесоболотных комплексов. Как видно из приведенных записей яркостных контрастов, в зонах пожаров для классификации контролируемых зон можно ввести шкалу пожарной опасности по критерию влажности, образовав соответствующие кластеры. Также возникает возможность введения индикатора нестабильности окружающей среды как показателя переходных процессов в лесной или лесоболотной экосистеме.

#### Библиографический список

1. Доррер, Г.А. Определение пожарной опасности в лесу методами дистанционного зондирования / Г.А. Доррер, С.П. Якимов // Известия вузов. Лесной журнал. – 2000. – № 3. – С. 67–70.
2. Бородин, Л.Ф. Технологический процесс измерения температурных аномалий в лесных и лесоболотных комплексах методами СВЧ-радиометрии / Л.Ф. Бородин, А.С. Миронов, В.Д. Бурков и др. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2008. – № 4. – С. 75–93.
3. Митник, Л.М. Исследование теплового режима штабелей торфа и торфяных болот методом СВЧ-радиометрии / Л.М. Митник, Л.Ф. Бородин, А.С. Миронов и др. // Торфяная промышленность. – 1977. – № 4. – С. 27–30.
4. Бородин, Л.Ф. Динамика радиотеплового излучения и оценка пожарной опасности лесных напочвенных покровов / Л.Ф. Бородин, Е.Н. Валендик, Е.К. Кисляхов и др. // Сб. Современная проблематика дистанционных исследований геосистем, ИГ АН СССР. – М., 1983. – С. 129–137.
5. Бородин, Л.Ф. О применении СВЧ-радиометрии к исследованию лесных пожаров / Л.Ф. Бородин, К.П. Кирдяшев, Ю.П. Стаканкин и др. // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. XI. – № 9. – С. 1945–1950.
6. Нестеров, В.Г. Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 289 с.
7. Бородин, Л.Ф. Дистанционная индикация лесных пожаров методом СВЧ-радиометрии / Л.Ф. Бородин, Л.М. Митник. – Лесное хозяйство. – 1977. – № 6. – С. 355–362.
8. Миронов, А.С. Основные расчетные соотношения метода измерения диэлектрических параметров сыпучих материалов на СВЧ при полном заполнении полости объемного резонатора / А.С. Миронов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2004. – № 5. – С. 14–17.
9. Курбатский, Н.П., Определение степени пожарной опасности в лесах / Н.П. Курбатский. – Лесное хозяйство. – 1957. – № 7. – С. 229–235.
10. Maki M., Ishiahra M., and Tamura M. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 2004, vol. 90, No. 4, pp. 441-450.

### ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

В.Д. БУРКОВ, *проф. каф. ПТПП МГУЛ, д-р техн. наук,*  
Ю.С. КАПРАНОВ, *нач. лаборатории ФГУП «НИИ Прецизионного приборостроения,*  
С.В. ПЕРМИНОВ, *асп. каф. ПТПП МГУЛ,*  
Н.А. ХАРИТОНОВ, *с. н. с. МГУЛ, канд. техн. наук*

*caf-sau@mgu.ac.ru; av60017@comtv.ru*

Ужесточение требований, предъявляемых к космическим комплексам на современном этапе, вызвано как экологическими, так и экономическими аспектами, что влечет за собой минимизацию габаритно-весовых характеристик космического аппарата (КА) и увеличение срока активного существования КА.

Следовательно, предъявляются повышенные требования к надежности бортовой аппаратуры при одновременном увеличении объемов задач, решаемых тем или иным КА [1, 2].

Надежность функционирования КА определяется в первую очередь надежностью его системы управления и безотказностью

информационных систем, обеспечивающих функционирование вычислительно-управляющего комплекса. В состав абсолютно любой системы управления, в том числе и бортовым управляющим комплексом КА, входят разнообразные системы передачи данных. В качестве среды передачи на борту КА все шире используются оптические кабели (ОК). В процессе эксплуатации элементы системы передачи информации, в том числе и волоконно-оптический тракт на базе ОК, подвержены деградации под действием тех или иных факторов космического пространства (ФКП).

По современным представлениям, основную роль в снижении качества передачи информации по ОК в условиях космического пространства играют радиационные эффекты за счет воздействия на элементы волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) протонов космических лучей и электронов, входящих в состав корпускулярного излучения Солнца и захваченных магнитным полем Земли.

Факторы, определяющие воздействие заряженных частиц и излучений солнечного ветра на элементы бортовой аппаратуры, к настоящему моменту изучены достаточно хорошо. Следует отметить, что КА, применяемые для народнохозяйственных и военных целей, обращаются вокруг Земли по типовым орбитам. Для каждой из таких орбит постоянно проводится мониторинг радиационных полей и определяются средние потоки заряженных частиц [3]. По данным многолетнего мониторинга околоземного космического пространства составлены карты распределения частиц [4, 5].

В работе [3] приведены значения плотности потоков заряженных частиц и детально рассмотрены области космического пространства, в которых размещаются КА различного назначения. На этом же рисунке показаны проекции орбит КА «массовых серий». К таким аппаратам можно отнести КА на стационарной орбите, КА типа «Молния-1,2,3», аппараты для целей навигационного обеспечения, КА для исследования природных ресурсов и т.д. Процессы, происходящие в верхней ионосфере на расстояниях порядка 10 радиусов Земли (около 70 тыс. км), изучаются весьма тщательно. На борту практически всех околоземных космических аппаратов устанавливается радиометрическая аппаратура. На рис. 1 схематически показаны проекции на плоскость геомагнитного меридиана четырех основных типов траекторий, на которых функционируют как российские, так и зарубежные КА связи, навигации и телевидения.

Как видно из рис. 1, орбиты космических аппаратов различного назначения пересекают практически все основные зоны верхней ионосферы, включая радиационные пояса планеты. Указанные типы космических аппаратов имеют срок активного существования более пяти лет, что позволяет проводить длительные однородные измерения.

Орбита 1 соответствует полярной орбите с наклоном 73–83° на высоте ~1000 км, на которую запускались КА серии «Космос», а в настоящее время – КА серии «Муссон». Период обращения этих КА составляет ~110–120 мин.

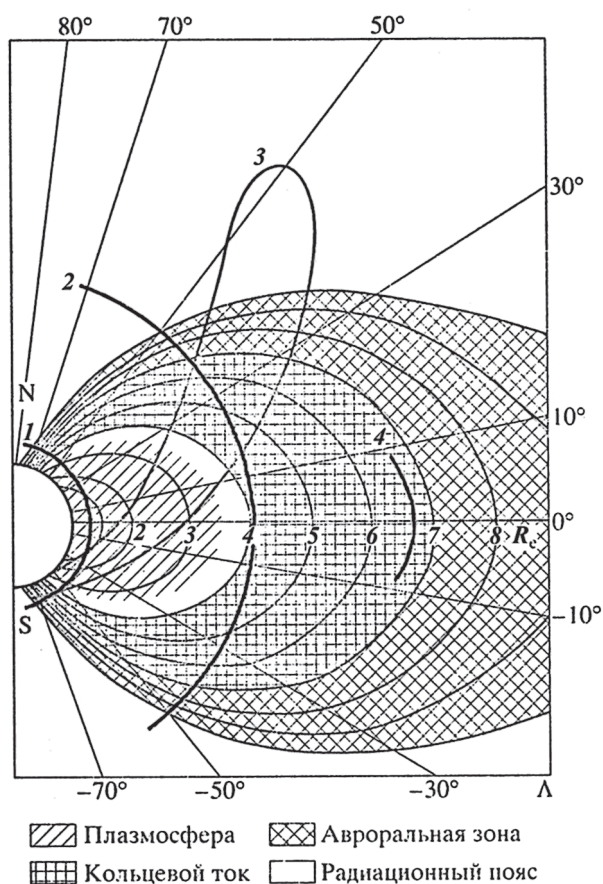


Рис. 1. Проекция орбит КА на магнитосферные области околоземного космического пространства



**Усредненные значения экспозиционных доз облучения  
для различных околоземных орбит КА**

САС (годы)	Параметры орбиты, км							
	Орбита № 1 круговая, 1000 км		Орбита № 2 круговая, 20 000 км		Орбита № 3 эллипт, 36 000 км/ 500 км		Орбита № 4 стационар, 36 000 км	
	<i>p</i>	<i>e</i>	<i>p</i>	<i>e</i>	<i>p</i>	<i>e</i>	<i>P</i>	<i>e</i>
1	$6,8 \cdot 10^3$	$9,3 \cdot 10^3$	<1	$2,0 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^4$
5	$3,4 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^4$	<1	$1,0 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^5$
7	$4,7 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$	<1	$1,4 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^5$
10	$6,8 \cdot 10^4$	$9,2 \cdot 10^4$	<1	$2,0 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^5$	$4,7 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^5$
15	$1,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	<2	$3,0 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^5$

Эта орбита позволяет контролировать область внутреннего радиационного пояса, низковысотные отроги внешнего радиационного пояса и область кольцевого тока вблизи Земли.

Орбита 2 представляет круговую орбиту на высоте 20,0 тыс. км с наклоном  $65^\circ$ , на которой функционируют КА серий «Глонасс» и «ЯРС». Период обращения КА на этой орбите равен  $\sim 12$  час. Эта траектория проходит практически через центр внешнего радиационного пояса в районе геомагнитного экватора на  $L \sim 4,0$ .

Орбита 3 – эллиптическая орбита КА серии «Молния» и аналогичных, с апогеем  $\sim 39,6$  тыс. км и наклоном  $65^\circ$ . Эта орбита пересекает все основные структурные области внутренней магнитосферы.

Орбита 4 является геостационарной орбитой на высоте 36,6 тыс. км. Геомагнитная широта, на которой функционируют геостационарные КА, зависит от долготы и находится в пределах  $\pm 11^\circ$  относительно геомагнитного экватора. Этот разброс широт изображен на рис. 3 отрезком дуги на  $L = 6,6$ .

Исходя из существующей модели радиационных поясов Земли и зная энергетический спектр заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем, можно оценить усредненные показатели экспозиционных и поглощенных доз облучения. В работе С.В. Перминова [6] приведена сводная таблица, в которой указаны значения поглощенных доз для КА, находящихся на тех или иных орбитах в зависимости от срока активного существования (САС) КА. Как можно видеть из данных, приведенных в работе [6], в наиболее жестких условиях, с точки зрения суммарной

поглощенной дозы, находятся КА, функционирующие на орбите 1-го типа.

В работах [3,6] приведены картины распределения заряженных частиц (протонов и электронов) различных энергий. Эти данные позволяют оценить уровни экспозиционных доз облучения аппаратуры КА для различных орбит. Следует учитывать, что «хвост» магнитосферы простирается от Земли на расстояние порядка сотен тысяч километров, и пересечение аппаратом хвостовой области магнитосферы приводит к дополнительному облучению бортовой аппаратуры.

На основании данных, приведенных в работах [3, 6], а также таблиц плотностей потоков частиц, показанных в ГОСТ [4, 5], можно с достаточной точностью прогнозировать суммарные экспозиционные дозы, которые будут набраны аппаратурой КА на орбитах 1–4 (см. выше). Поскольку в дальнейшем данные по усредненным экспозиционным дозам облучения будут необходимы для детальной оценки стойкости оптических волокон к воздействию ФКП, то в настоящей работе авторы свели расчетные данные для наиболее «популярных» орбит в таблицу.

В таблице в колонках «*p*» приведены значения поглощенных доз, обусловленных действием протонов, а в колонках «*e*» – значения поглощенных доз, обусловленных действием электронов космических лучей. Поглощенные дозы, указанные в табл., рассчитаны для элементов аппаратуры, которые располагаются за защитой в виде стандартного слоя экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ).

Величина поглощенной дозы является почти линейной функцией САС и зависит толь-

ко от параметров орбиты КА. Суммарная поглощенная доза будет определяться сложением доз от воздействия электронов и протонов.

$$D_{\text{полн}} = D_e + D_p.$$

Именно эта поглощенная доза и будет оказывать негативное воздействие на работу бортовой аппаратуры КА.

В современных волоконно-оптических системах, нашедших применение в бортовой аппаратуре систем управления КА, используются в основном два типа волоконных световодов (ВС): «кварц–кварц» и «кварц–полимер». Устойчивость ВС к воздействию ионизирующих излучений определяется величиной радиационно-наведенных потерь (РНП)  $\Delta\alpha$ .

Масштабы воздействия ионизирующих излучений радиационных поясов Земли и космических лучей таковы, что неравномерность потока частиц в пределах КА будет исчезающе малой. Следовательно, вполне справедливо применение изотропной сферической модели радиационного нагружения, т.е. в пределах КА дозовые нагрузки будут постоянными и зависимыми лишь от параметров орбиты. Следовательно, радиационная устойчивость (или радиационно-наведенное поглощение) аппаратуры будет определяться только линейными размерами. В случае использования бортовых ВОСП таким параметром будет являться длина волоконно-оптического тракта.

Для «традиционных» оптических волоконных световодов уровень наведенного поглощения определяется типом ОВ (одномодовое, многомодовое), характером легирующих примесей и технологией изготовления.

Дозовая зависимость радиационно-наведенных потерь в оптических волоконных световодах  $\Delta\alpha = \Delta\alpha(D_\gamma)$  при малых значениях мощности экспозиционной дозы ( $d(D_\gamma)/dt < 10^3$  Р/с и относительно небольшой экспозиционной дозе эквивалентного гамма-излучения ( $D_\gamma < 10^4$  Р) имеет линейный характер и может быть выражена как

$$\Delta\alpha = kD_\gamma,$$

где  $D_\gamma$  – экспозиционная доза облучения, Р.

Исследования радиационной стойкости волоконных световодов [7, 8] позволили с достаточной степенью достоверности опре-

делить значение коэффициента  $k$  различных типов. Для ВС типа «кварц–кварц» значение  $k$  составляет 0,03 дБ/км, а для ВС типа «кварц–полимер»  $k = 0,008$  дБ/км.

С учетом того факта, что даже на максимально опасных с точки зрения поглощенных доз радиации уровень мощности экспозиционной дозы не превышает значения  $3,1 \cdot 10^{-3}$  Р/с, то следует рассмотреть эффекты, возникающие в ОВ под воздействием ионизирующих излучений при малых интенсивностях. В работе [9] рассмотрены механизмы образования наведенных потерь в ОВ под действием проникающей радиации. Наведенные потери в кварцевых стеклах вызваны образованием т.н. центров окраски (ЦО) за счет нарушения химических связей, образующих матрицу (кристаллическую решетку) стекла. В.Д. Бурков и Г.А. Иванов (2008) в своей работе [9] рассматривали следующие основные ЦО: так называемые  $E'$ -центры, возникающие за счет разрывов валентных связей  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ , пероксильные радикалы, появляющиеся в присутствии избытка кислорода в стекле, образование кислородных вакансий и некоторых других дефектов решетки. Все эти дефекты характеризуются образованием свободных носителей заряда (электронов), на которых и происходит поглощение оптического излучения. Следует отметить, что полосы поглощения, характерные для кварцевых стекол, в отсутствие примесей приходятся в основном на коротковолновую ( $\lambda = 0,163., 0,191., 0,230., 0,248., 0,250$  и  $0,390$  мкм) часть спектра. Исключение составляют пероксильные радикалы, которые имеют полосу поглощения на  $\lambda = 0,63$  мкм, что дает остаточное наведенное поглощение на длинах волн, предназначенных для передачи сигнала по ОВ. Все эти дефекты характерны для беспримесного кварцевого стекла и обладают сравнительно коротким временем жизни. В случае наличия примесей возникновение ЦО будет обусловлено наличием ионных центров поглощения, образующихся вокруг электронных оболочек атомов примеси. Такие центры характеризуются длительным временем существования (от часов до десятков суток) и способны внести значительный вклад в наведенное поглощение, вызванное ионизирующим излучением.

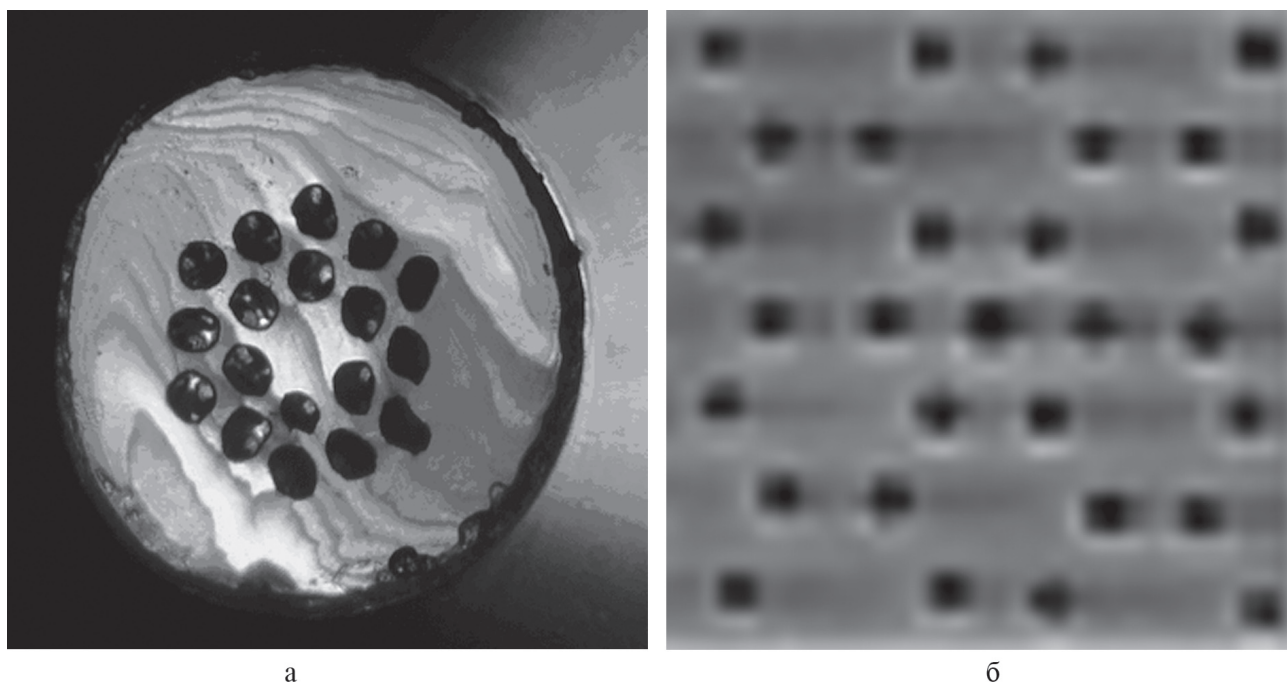


Рис. 2. Поперечное сечение ОВ со структурой фотонного кристалла: а – МОВ со структурой IG-волокна; б – МОВ со структурой PBG-волокна

Меняя химический состав легирующих примесей, возможно несколько повысить радиационную стойкость световодов. Тем не менее, кардинальным образом разрешить возникшую проблему для световодов с распределенным по сечению показателем преломления не удалось.

Авторы разделяют мнение, что волоконно-оптические приборы и системы связи – ключевое направление развития информационных систем. Это мнение справедливо и для аппаратуры космического базирования. Применение волоконных световодов в качестве среды передачи не только снизит массо-габаритные характеристики бортовых систем, но и позволит существенно повысить скорость обработки информации. Появится возможность обработки первичной информации в реальном масштабе времени. За счет такой обработки первичного информационного потока удастся существенно снизить нагрузку на канал связи «орбита КА–Земля», что приведет к повышению эффективности всего космического комплекса в целом.

Решение возникшей проблемы может быть найдено, если мы сможем создать принципиально новую среду передачи оптического сигнала, свободную от недостатков, органически присущих «классическим»

системам на базе оптических волокон с распределенным профилем показателя преломления. Поскольку профильный характер показателя преломления в оптических световодах достигается путем внесения легирующих примесей, то следует поискать возможность создания направляющих систем, полностью исключающих наличие таких примесей.

В последнее время активно исследуется новый тип волоконных световодов – микроструктурные оптические волокна (МОВ). В МОВ, в отличие от «традиционных» оптических волокон, светонесущая структура формируется не за счет изменения показателя преломления по сечению структуры «сердцевина – оболочка», а при помощи продольных микроканалов, встроенных в структуру МОВ, которые наполнены газом (воздухом) [10, 11]. В некоторых источниках структуры МОВ называют фотонно-кристаллическими волокнами (ФКВ) [11, 12].

В микроструктурных, или фотонно-кристаллических волокнах прохождение света в сердцевине связано не с эффектом полного внутреннего отражения, а отражения от периодической структуры, и показатель преломления сердцевины может быть любой, а сердцевина – полый. Это обстоятельство наиболее привлекательно для построения

ВОСП на борту КА. Поскольку распространение света будет происходить в среде, которая мало подвержена воздействию ионизирующих излучений, то в балансе потерь будет полностью исключены потери света в материале.

### ***IG-волокно (Index-guiding photonic crystal fiber)***

Данное волокно является логическим продолжением классических световодов. Правда, направляющие свойства этих волокон обусловлены разностью показателей преломления сердцевины (кварц) и оболочки, которая представляет собой фотонный кристалл. Этот тип волокна позволяет обеспечить весьма высокую широкополосность направляющей системы, причем направляющие свойства сохраняются в диапазоне длин волн, которые недоступны для «классических волокон» [10, 12]. Структура поперечного сечения такого ОВ представлена на рис. 2, а.

### ***PBG-волокно (Photonic band gap fiber)***

Данный тип оптического волокна со структурой фотонного кристалла изображен на рис. 2, б. Данное волокно имеет полую сердцевину, вокруг которой расположен ряд слоев с периодически изменяющимся коэффициентом преломления. Такие волноводы относятся к классу Брэгговских волокон. В этих волокнах электромагнитные волны отражаются периодическими структурами. Основные свойства таких волокон даны в [10]. В этих волокнах нас интересует прежде всего то обстоятельство, что направляющие свойства Брэгговских решеток слабо зависят от вносимых оптических потерь. Именно это свойство **PBG-волокон** позволяет видеть в них основного кандидата на роль оптических направляющих систем, которые и найдут самое широкое применение на борту космических аппаратов.

Отсутствие легирующих примесей в материале волокна, а чистый и сверхчистый кварц способен выдерживать значительные дозовые нагрузки, распространение основной электромагнитной волны в газовой среде, т.е. среде, принципиально малочувствительной к ионизирующей радиации – все это позволяет

прогнозировать высокую степень радиационной устойчивости волоконно-оптических трактов на основе микроструктурированных волокон.

К сожалению, в настоящий момент практически отсутствуют работы, посвященные этому вопросу. Поэтому следует обратить внимание на возможность проведения экспериментальных работ на моделирующих установках для оценки их радиационной стойкости.

В последние годы появились работы, посвященные т.н. оптическим световодам, устойчивым к изгибу, – УИОВ (*bend-capable fibre, BCF*). По сравнению с обычным волокном в них существенно снижены оптические потери, вызванные «вытеканием» излучения при распространении по изогнутому волокну. Данные характеристики достигались посредством создания сложного профиля показателя преломления путем введения дополнительных оболочек с показателем преломления меньшим, нежели в сердцевине ОВ. Сама сердцевина одномодового ОВ изготавливалась из синтетически модифицированного кварца, свободного от примесей. В некоторых работах [13, 14] волокна такого типа назывались наноструктурированными ОВ. Основной принцип, принятый при создании таких ОВ, заключается в создании вокруг сердцевины круговой области с более низким по сравнению с периферийной внешней оболочкой показателем преломления. Первыми из таких ОВ были созданы волокна с «депрессивной» защитной оболочкой вокруг направляющей сердцевины ***depressed cladding***. Позднее эти ОВ получили название ***Protected core fibre***. Затем, путем добавления дополнительного охранного кольца вокруг сердцевины было создано ОВ ***Trench-assisted fibre***. Благодаря своим высоким характеристикам – низким начальным потерям, стойкостью к изгибанию и сердцевина из модифицированного синтетического кварца – эти ОВ нашли применение при создании подводных оптических кабелей. Все вышеперечисленное относится и к фотонным кристаллическим волноводам, о которых говорилось выше. Но на сегодняшний день наилучшими характеристиками к старению и изгибу обладают структуры с



«твердотельным защитным кольцом стекла» (*solid glass ring-protected*). Эта конструкция обеспечивает потери менее 0,1 дБ на изгибах радиуса до 5 мм. Следует отметить, что по данным [13], характеристики потерь сохраняются до 40 лет. Поскольку это ОВ по имеющимся данным мало подвержено эффектам старения, а к таким эффектам можно отнести и воздействие естественного радиационного фона с интенсивностью до  $10^{-3}$  Р/час, то следует повнимательнее рассмотреть стойкость ОВ типа *solid glass ring-protected* к воздействию ионизирующих излучений низкой интенсивности.

Отсутствие легирующих примесей в составе сердцевины такого ОВ, выполненного на основе наноструктурированного плавного кварца, низкая интенсивность излучения, проникающего в структуру оболочки, а также дополнительная защита за счет наличия внешнего стеклянного покрытия ОВ делает такие волокна весьма перспективными для создания оптических кабелей для эксплуатации на борту КА.

На основании приведенных характеристик и предварительной оценки свойств наноструктурированных ОВ мы вправе ожидать значительного уменьшения параметра  $k$  (см. формулу для оценки наведенного поглощения в начале статьи) по крайней мере в пределах одного порядка. Даже такая величина позволит довести время сохранения работоспособности ОВ на борту КА до 30–50 лет.

#### Библиографический список

1. Перминов, А.Н. Космические войска: Основы управления поддержанием боеготовности и развитием / А.Н. Перминов // Стратегическая стабильность. – 2003. – № 1 – С. 56–62.
2. Бурлаков, А.Б. Антропогенные возмущения ионосферы как дестабилизирующий фактор гелиобиосферных корреляций / А.Б. Бурлаков, Ю.С. Капранов, Г.Э. Куфаль и др. // Вестник Калужского университета. – 2007. – № 1. – С. 15–24.
3. Власова, Н.А. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских космических аппаратах связи, навигации и телевидения / Н.А. Власова, В.И. Верхотуров, О.С. Графодатский и др. // Космические исследования. – Т.37. – № 3. – С. 245–255.
4. ГОСТ 25645.138-86 Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов.
5. ГОСТ 25645.139-86 Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов.
6. Перминов, С.В. Анализ влияния ионизирующих излучений космического пространства на работоспособность и срок службы элементов волоконно-оптических систем передачи данных / С.В. Перминов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – Т. 8. – № 9. – С. 40–44.
7. Беляев, Р.А. Применение метода оптической рефлектометрии для исследования радиационной устойчивости волоконных световодов / Р.А. Беляев, А.И. Бондарев, И.И. Долгов и др. // Радиотехника. – 1991. – № 8. – С. 87–90.
8. Бурков, В.Д. Перспективы применения микроструктурных световодов для создания бортовых высокоинформативных систем передачи данных / В.Д. Бурков, С.В. Перминов, Н.А. Харитонов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2007. – № 2(51). – С. 23–28.
9. Бурков, В.Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники: монография / В.Д. Бурков, Г.А. Иванов. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 332 с.
10. Базаров, Е.Н. Электродинамика волоконно-оптических световодов: Монография / Е.Н. Базаров. – М.: МГУЛ, 2004. – 148 с.
11. Соколов, С.А. Сети доступа и абонентская проводка как наиболее перспективное применение фотонно-кристаллических волокон / С.А. Соколов, Е.А. Зелюдков // Электросвязь. – 2007. – № 4. – С. 58–61.
12. Kuhlmeiy B. T., White T. P., Maystre D., Renversez G., Botten L.C., Martijn de Sterke C. , McPhedran R.C. , J. Opt. Soc. Am. B, 19, 2331-2339 (2002)
13. Джорж, Дж. Характеристики и применение волокон с улучшенными параметрами изгиба / Дж. Джорж, П. Вайнманн, О. Шур и др. // Lightwave Russian edition. – 2008. – № 3. – С. 24–28.
14. Дойч, Б. Новая технология создает предпосылки для прокладки оптического кабеля в многоквартирных домах / Б. Дойч, Д. Веласкес // Lightwave Russian edition. – 2008. – № 1. – С. 30–35.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

А.А. ВОЛЫНЦЕВ, *главный конструктор НИИ ПМ им. ак. В.И. Кузнецова, канд. техн. наук,*  
Б.А. КАЗАКОВ, *главный научный советник НИИ ПМ им. ак. В.И. Кузнецова, канд. техн. наук,*  
И.Е. ШУСТОВ, *асп., начальник сектора, НИИ ПМ им. ак. В.И. Кузнецова*

*shustov\_igor@mail.ru; info@niipm.ru*

**В** настоящее время для космической техники стала очень актуальной задача дистанционного зондирования Земли с помощью маневренных спутников. В связи с этим существенно ужесточаются требования, предъявляемые к инерциальным системам, которые используются на этих спутниках. В частности, встает задача по увеличению диапазона измерения угловой скорости спутника с одновременным уменьшением цены единицы младшего разряда выходной информации.

На современных отечественных спутниках, на которых требуется высокая точность ориентации в инерциальном пространстве, а, следовательно, и высокая точность измерения угловой скорости их движения, используются бесплатформенные инерциальные блоки типа ГИВУС (гироскопический измеритель вектора угловой скорости) на базе поплавковых гироскопов. Наиболее точными из этого класса приборов являются приборы КИНД34-020/027 разработки НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова. Эти приборы взяты за основу для создания более совершенного прибора с характеристиками, отвечающими поставленным задачам. В данном докладе описываются методы усовершенствования данного типа приборов.

### Увеличение диапазона измерения входной угловой скорости

Для решения задачи увеличения диапазона измерений потребуется внедрение достаточно большого числа технических изменений в схемах отдельных устройств и самой измерительной системы прибора (увеличение диапазона с  $0,5\epsilon/\text{с}$  до  $2,0\epsilon/\text{с}$ ).

Увеличение диапазона измерения входной угловой скорости ( $\omega_{\text{диап}}$ ) до  $2\%$  должно проводиться с условием, что оно не повлечёт за собой увеличения цены им-

пульса выходной информации прибора ( $\beta$ ). Это значит, что показатель информационной добротности ИК  $J = \omega_{\text{диап}}/\beta$  должен многократно возрасти и достичь значения свыше  $J_{\text{треб.}} = 200\text{кГц}$ . А это уже техническая проблема. Проблемой также станет обеспечение требуемого динамического диапазона измерений ( $D = \omega^{\text{max}}/\omega^{\text{min}}$ ), который в данном случае должен быть близким к  $10^7$ . Иными словами, ИК прибора должен представлять собой не менее чем 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Кроме того, потребителю необходимо иметь возможность вести управление угловой скоростью КА с разрешающей способностью измерителя, близкой к  $10^{-5}\%$ . Для этого цена импульса единицы младшего разряда выходной информации должна быть уменьшена до значения  $\beta = 0,005$  дуг.с.

Таким образом, показатель информационной добротности ИК должен еще более возрасти и иметь величину  $J_{\text{треб.}} \geq 1000\text{кГц}$ .

В итоге анализ возможности реализации этих требований показывает, что построение прецизионного измерителя в варианте применяемой в приборах типа КИНД34-020/027 одноотсчетной системы измерения является практически неразрешаемой технической задачей.

Отсюда следует необходимость построения двухотсчетной системы измерений, т.е. состоящей из двух линеек измерений.

Первая линейка измерительной системы (первый отсчет) выполняет роль измерителя в полном диапазоне измеряемой величины, но она имеет достаточно грубую цену разрядности (в смысле «шага» измерения, но точность этого «шага» остается высокой).

Вторая линейка измерительной системы (второй отсчет) осуществляет измерения внутри одного «шага» первой линейки (она

выполняет роль «нониуса», позволяющего значительно увеличить разрядность измерения).

При использовании двухотсчетной системы результат измерения складывается из отсчетов обеих линеек.

При представлении результата измерений в двоичном коде первая линейка (старшая) формирует старшие разряды, а вторая линейка (младшая) – младшие разряды информации. При этом совершенно необходимо, чтобы количественное отношение единиц младших разрядов обеих линеек было строго кратным «2». Технически можно обеспечить регулировку его так, чтобы оно было кратным «2» и с точностью, близкой к требуемой величине  $10^{-5}$ , но при этом удержать эту точность в течение всего срока эксплуатации будет весьма проблематично. Главное, чтобы диапазон измерения с помощью младшей линейки с запасом превышал одну ступень измерения старшей линейки. Только в этом случае будет надежно обеспечиваться совместимость (стыковка) обеих линеек.

Оптимально, если старшая линейка будет занимать 5 старших разрядов, а младшая линейка – оставшиеся 10 разрядов в полном числовом слове, содержащем информацию о накопленном угле. При этом оптимальность выбранного соотношения линеек будет заключаться в том, что диапазон измерений младшей линейки будет равен  $\omega_{\text{мл.диап.}} \leq 400^\circ/\text{ч}$  и уже его одного будет достаточно для измерения орбитальной угловой скорости КА любого назначения, работающего на любой орбите (ГСО – геостационарная или НО – низкая орбиты). В таком варианте старшая линейка будет автоматически включаться в работу («пристраиваться»), если скорость углового вращения КА превысит диапазон  $\omega_{\text{мл.диап.}}$  (к примеру, когда КА потребуются работать в режимах успокоения, переориентации, закрутки или перенацеливания).

### **Принцип построения обратной связи измерительного канала (ИК)**

Систему обратной связи (СОС) ИК прибора необходимо строить на аналоговом принципе, которому не свойственны погрешности типа «зона нечувствительности».

Однако целиком весь контур СОС строить на аналоговом принципе тоже нельзя,

так как в этом случае не удастся создать высокоточный преобразователь типа «аналог-код» с высоким  $J_{\text{инф}}$  (более 1000 кГц).

Отсюда следует необходимость построения СОС ИК, состоящей из двух контуров, что также отвечает принципу построения двухотсчетной измерительной системы.

С точки зрения построения систем автоматического регулирования оба контура будут различны.

Первый контур – линейный. Он осуществляет разгрузку гироблока (ГБ) от гироскопического момента в пределах входной угловой скорости до  $0,1^\circ/\text{с}$ .

Второй контур – импульсный, работающий в режиме биполярного ШИМа. Он включается в работу при входной угловой скорости от  $0,08^\circ/\text{с}$  и до максимума. При этом в обмотку ДМ<sub>старш.</sub> подаются биполярные импульсы на частоте  $f_{\text{ст.}} = 250$  Гц, в которых дискретно меняются длительности положительного и отрицательного его полупериодов по принципу ШИМа. Наличие одного дискрета в каждом импульсе обеспечивает компенсацию угловой скорости величиной  $0,08^\circ/\text{с}$ . В результате подключения второго контура рабочий сигнал первого (линейного) контура возвращается в «ноль». При увеличении входной угловой скорости до  $0,16^\circ/\text{с}$  (то есть дополнительно еще на  $0,08^\circ/\text{с}$ ) компенсирующий импульс увеличивает разностную длительность полупериодов ШИМ до двух дискретов. Линейный контур вновь «сбрасывается» в «ноль» и т.д. при дальнейшем нарастании входной угловой скорости. При ее снижении происходит обратный процесс, но второй контур начинает «списывать» набранное число дискретов уже при текущем значении рабочей точки линейного канала на величине «минус»  $0,08^\circ/\text{с}$ . При другом знаке входной угловой скорости процесс набора во втором контуре компенсирующих дискретов происходит с противоположным знаком.

### **Построение измерительной системы модернизированного прибора**

В приборах КИНД34-020/027 измерительно-преобразующее устройство (ИПУ) включено непосредственно в контур СОС

(рис. 1), что гарантирует полное соответствие между рабочим сигналом в СОС и выдаваемой во вне информацией.

С помощью ИПУ управление током в исполнительном органе СОС (ДМ ГБ) ведется в режиме биполярного ШИМа, который позволяет иметь высокий показатель информационной добротности (более 20 кГц) с сохранением высокой линейности выходной характеристики ИК ( $\delta K_{\text{нел.}} \leq 0,005\%$ ). Однако впоследствии выявился существен-

ный недостаток принципа ШИМ тока, который проявился в зависимости «нуля» ИК от стабильности разности фронтов импульсов положительной и отрицательной полярностей тока. Так, при диапазоне измеряемой скорости 0,5 %/с стабильность разности фронтов импульсов тока должна быть не хуже  $\pm 2$  наносекунд за сутки. При скорости 2 %/с требование по стабильности разности фронтов импульсов возрастает в 4 раза, и выполнить это требование уже будет невозможно.

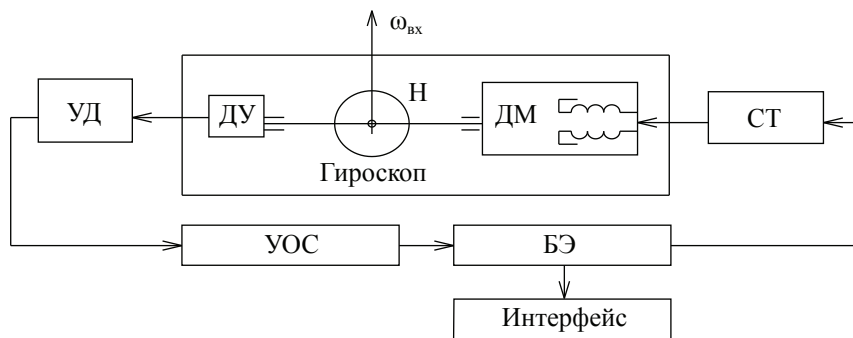


Рис. 1. Схема обратной связи прибора КИНД34-027. Работает по принципу широтно-импульсной модуляции управляющего тока: УД – усилитель дифференциатор; УОС – усилитель обратной связи; БЭ – блок электроники; СТ – стабилизатор тока

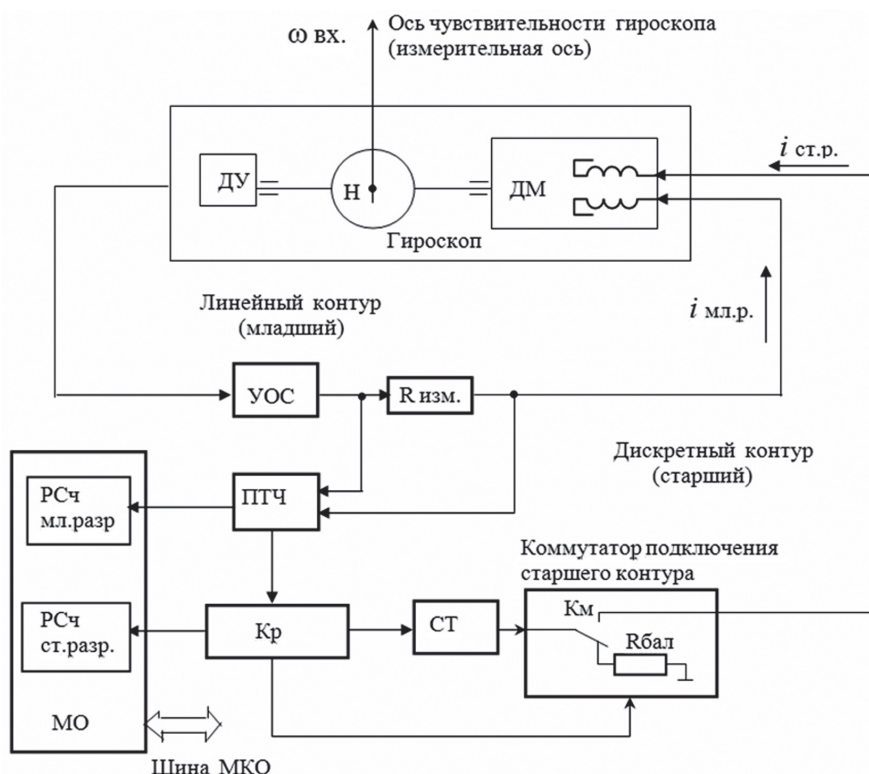


Рис. 2. Блок-схема измерительного канала двухотсчетной системы: Н – кинетический момент гироскопа; ДУ – чувствительный элемент – датчик угла гироскопа; ДМ – исполнительный орган – датчик момента гироскопа; УОС – регулятор системы – усилитель обратной связи; ПТЧ – преобразователь ток – частота; Кр – контроллер, обеспечивающий логическое управление контуром старшей линейки; СТ – стабилизатор тока; РСч – реверсивный счетчик;  $i$  – токи в обмотках ДМ старшей и младшей линеек; МО – модуль обмена



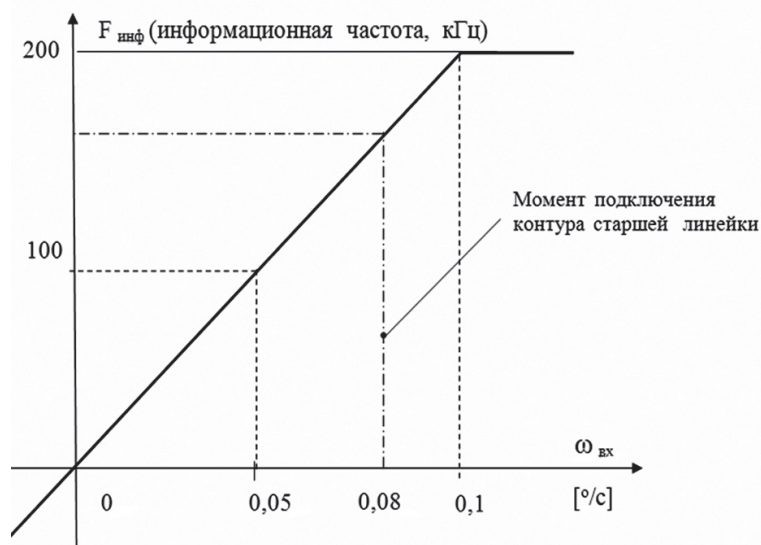


Рис. 3. Выходная характеристика старшей линейки

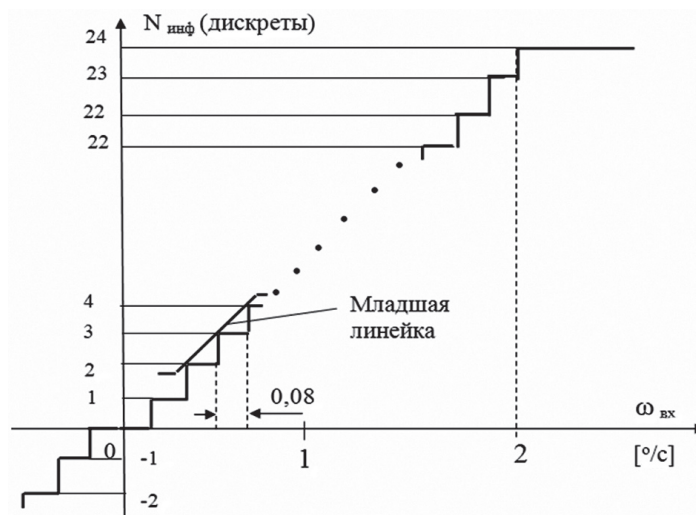


Рис. 4. Выходная характеристика младшей линейки

Т а б л и ц а

Характеристики	Прибор КИНД34-020, 027	Модернизированный прибор
1. Диапазон измерения входной угловой скорости, °/с	0,5	2,0
2. Цена дискреты младшего разряда информации, дуг.с.	0,036	0,005-младшая линейка, 1,2 – старшая линейка
3. Стабильность нулевого сигнала, град./ч	0,003	0,0015– младшая линейка, 0,005 – при обеих линейках
4. Шум при интервале осреднения 0,1 – 10с, дуг.с(σ)	0,15	0,08 – младшая линейка, 1,2 – при обеих линейках

В данном проекте измерение входной физической величины будет строиться на комбинированном принципе, представленном на рис. 2.

Измерительная система будет иметь две ветви, в каждой из которых измерительно-информационное преобразование будет вес-

тись на разных технических принципах. Эти же ветви являют собой две линии отсчета.

Первая ветвь включает в себя  $R_{изм}$  и ПТЧ. Вторая ветвь содержит те же  $R_{изм}$  и ПТЧ, но к ним подключены Кр (контроллер) и СТ. Обе ветви одинаково передают информацию в МО. Если модуль входной угловой скорости

не превышает  $0,08 \text{ }^\circ/\text{с}$ , то в измерении участвует только первая ветвь – младшая линейка. При этом главное ИПУ этой ветви (ПТЧ) ведет работу в разомкнутом цикле, то есть вне контура СОС. Если модуль входной угловой скорости выходит из пределов  $0,08 \text{ }^\circ/\text{с}$ , то в работу включается вторая ветвь. В этом случае ИПУ и ПТЧ вместе с Кр и СТ уже находятся в составе контура СОС и участвуют в ее динамике. В этом и заключается суть комбинированного принципа построения функциональной схемы ИК.

Выходные статические характеристики обоих измерительных контуров представлены на рис. 3 и рис. 4.

### Итоговые результаты

Достоинством младшей линейки является то, что как всякая линейная система она позволит иметь наивысшую чувствительность в «нуле» системы. При этом составляющая «нуля», обусловленная электронной частью системы, будет существенно меньше, чем в варианте импульсной СОС. Преимуществом старшей линейки является то, что она на основе биполярного ШИМа позволит иметь наивысшую (с точки зрения возможно) линейность всей выходной характеристики ИК. Правда в контуре старшей линейки будет свой «ноль», поэтому в полете, возможно, придется его калибровать отдельно.

Выбор комбинированного принципа построения измерительной системы позволит получить на выходе прибора цену младшего разряда выходной информации с дискретностью порядка  $0,005 \text{ дуг.с}$ , что будет соответствовать суммарно по обеим линейкам показателю информационной добротности свыше  $1300 \text{ кГц}$ , чего ранее никогда не достигалось.

При этом следует особо отметить, что, несмотря на столь значительное повышение показателя информационной добротности, ошибка нуля системы, обусловленная сжатием фронтов импульсов ШИМа, в ПТЧ будет снижена по меньшей мере в 12 раз по сравнению с приборами КИНД34-020/027 (в 4 раза за счет снижения диапазона измерения младшей линейкой и в 3 раза за счет выбранной частоты работы ШИМ  $250 \text{ Гц}$ , вместо  $750 \text{ Гц}$ ). Таким образом, прогнозируемые точностные характеристики прибора можно представить в таблице.

### Библиографический список

1. Казаков, Б.А. Техническое предложение к проведению модернизации приборов типа КИНД34-020, 027. / Б.А. Казаков. – М.: НИИ ПМ, 2006. – КИНДЭ001, 1986 (на правах рукописи).
2. Казаков, Б.А. Отчет по СОИ прибора КИНД34-020 / Б.А. Казаков и др. – М.: НИИ ПМ, 1998. – КИНДЭ001.0413 (на правах рукописи).
3. Волынцев, А.А. ТУ на прибор КИНД34-020 / А.А. Волынцев, Б.А. Казаков. – М.: НИИ ПМ, 1998. – КИНД.402.132.020 ТУ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ НА ВАХ ТРАНЗИСТОРОВ МОП

С.В. ПУШКАРСКИЙ, *НИИ космических систем, канд. техн. наук*

*otmo53@mail.ru*

При решении проблемы обеспечения качества и длительных сроков активного функционирования КА на орбите важную роль играет качество комплектующих электрорадиоизделий бортовой аппаратуры, а также их реакция на воздействия факторов космического пространства. Среди электрорадиоизделий особую роль играют изделия полупроводниковой электроники, составляющие основу элементной базы бортовой

аппаратуры и одновременно наиболее чувствительные к воздействию радиации космического пространства. Поэтому исследования по разработке методов обеспечения длительной работоспособности изделий микроэлектроники на борту КА являются одной из важных задач при проектировании современных КА.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований воз-

действия радиации на вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП), которые являются основными полупроводниковыми элементами бортовой аппаратуры.

Известно, что ионизирующее излучение приводит к образованию поверхностных состояний (ПС) на границе раздела полупроводник-диэлектрик и накоплению паразитного заряда в окисле транзистора. При этом захваченный в подзатворном диэлектрике транзистора заряд приводит к изменению порогового напряжения  $\Delta V_{ot}$ , а ПС, кроме вклада в сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{it}$ , вызывают уменьшение крутизны сток-затворных ВАХ и возрастание параметра  $S$ , характеризующего наклон ВАХ на подпороговом участке. Кроме того, в приборах с коротким каналом радиационно индуцированные ПС приводят к ряду характерных эффектов, не наблюдаемых в длинноканальных МОП транзисторов (МОПТ).

Исследуемые образцы представляли собой  $p$ -канальные тестовые транзисторы с длиной канала 5 мкм, толщиной подзатворного окисла ( $\text{SiO}_2$ )  $d = 120$  нм и концентрацией легирующей примеси в подложке  $N_{sub} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Образцы облучались рентгеновскими квантами с энергией  $E \approx 25$  кэВ и дозой  $D \leq 10^6$  рад (Si) на установке ИРИС-МЗ. Результаты воздействия ионизирующего излучения на МОПТ оценивались по изменению подпороговых ВАХ. Пороговым напряжением МОП-транзистора считается напряжение на затворе, при котором ток стока достигает заданного значения (обычно  $10^{-5}$  А). В области слабой инверсии, когда напряжение на затворе МОП-транзистора меньше порогового, ток стока не равен нулю, а экспоненциально спадает с уменьшением напряжения на затворе. Этот ток называют подпороговым, а вольт-амперную сток-затворную характеристику называют подпороговой ВАХ. Метод снятия сток-затворных подпороговых ВАХ позволяет исследовать зарядовые эффекты (кинетику изменения плотности зарядов в окисле ( $Q_{ox}$ ) и на ПС ( $Q_{ss}$ ) области пространственного заряда полупроводника ( $Q_s$ ) и плотности ПС ( $N_{ss}$ ) при облучении. Измерения проводились на автоматизированной установке.

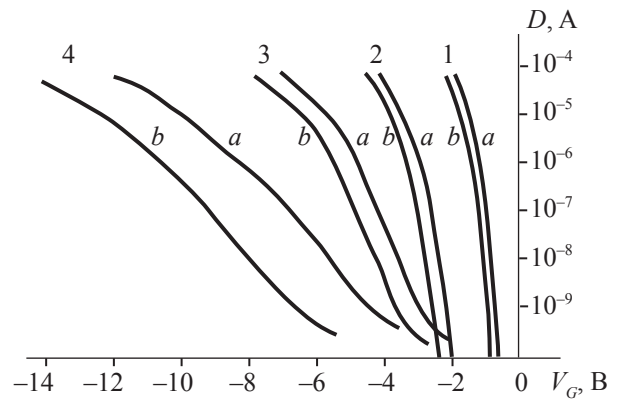


Рис. 1. Подпороговые ВАХ  $n$ -канальных МДПТ после облучения рентгеном в зависимости от наличия смещения на стоке  $V_D$  при различных дозах облучения  $D$ , рад: 1) исходные данные ВАХ, 2)  $D = 10^4$ ; 3)  $10^5$ ; 4)  $10^6$ . Напряжение на стоке  $V_D$ , В: 5 (b); 10 (a)

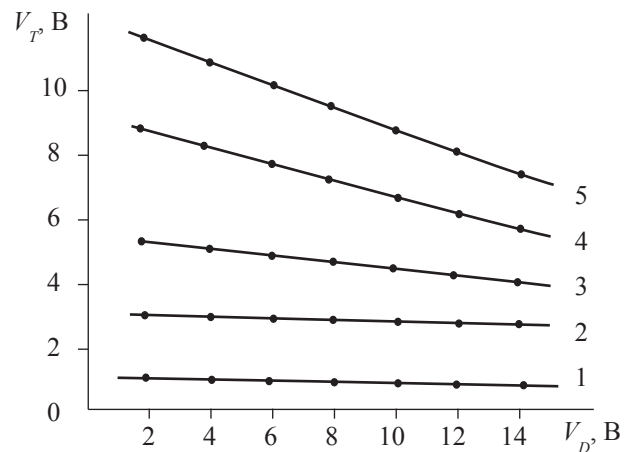


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения  $p$ -канальных МДПТ от напряжения на стоке при рентгеновском облучении. Доза облучения  $D$ , рад: 0 (1);  $10^4$  (2);  $10^5$  (3);  $5 \cdot 10^5$  (4);  $10^6$  (5)

На рис.1 представлены подпороговые ВАХ  $p$ -канального транзистора после облучения рентгеном с энергией кванта  $\sim 25$  КэВ, а на рис. 2 – соответствующие зависимости порогового напряжения  $\Delta V_T$  от напряжения на стоке  $V_D$  (пороговое напряжение определялось из аппроксимации зависимости тока стока  $i_d$  от напряжения на затворе  $v_g$  на квадратичном участке). Для исходных ВАХ характерна незначительная зависимость порогового напряжения от напряжении на стоке (кривые 1, рис. 1). Облучение приводит к деформации ВАХ. Во-первых, с увеличением поглощенной дозы уменьшается наклон подпороговой ВАХ. Во-вторых, усиливается зависимость порогового напряжения от смеще-

ния на стоке  $V_D$ . Эти особенности поведения параметров короткоканальных МОПТ могут быть объяснены двумерным эффектом разделения заряда ПС на части, экранируемые стоком и затвором. Экранирование части заряда ПС стоком увеличивает индуцируемый затвором заряд в полупроводнике, что приводит к открытию канала при меньших значениях порогового напряжения. Чем выше потенциал стока, тем больше доля экранируемого этим электродом заряда ПС и заметнее уменьшение порогового напряжения.

Функциональная зависимость порогового напряжения  $V_T$  от смещения на стоке определяется распределением плотности ПС по длине канала вблизи стока. При равномерном распределении ПС зависимость в координатах  $V_T - V_D$  можно представить в виде

$$V_T = V_{T0} - \gamma V_D. \quad (1)$$

Коэффициент  $\gamma$  зависит от величины полного заряда на ПС и в окисле и увеличивается с увеличением поглощенной дозы.

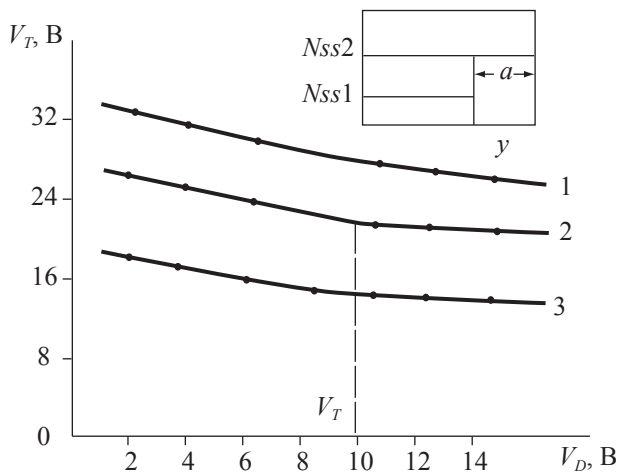


Рис. 3. Зависимость порогового напряжения  $p$ -канальных МДПТ от напряжения на стоке при облучении в РЭМ с напряжением на стоке. 1)  $V_D = 0$  В,  $N_e = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ; 2)  $V_D = 10$  В,  $N_e = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ; 3) облучена пристокковая область канала,  $N_e = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . На вставке – зависимость плотности ПС от координаты вдоль канала

При увеличении поглощенной дозы наблюдается искажение линейной зависимости  $V_T(V_D)$  (рис. 3, кривая 1), что может быть обусловлено неравномерным распределением ПС по длине канала ( $N_e = 10^{16} \text{ см}^{-2}$  – поверхностная плотность зарядов). Этот факт подтверждался известными модельными эк-

спериментами по облучению транзисторов с напряжением на стоке (кривая 2) и локальному облучению пристокковой части канала в растровом электронном микроскопе (РЭМ) (кривая 3).

В обоих случаях на кривой зависимости  $V_T(V_D)$  можно выделить два прямолинейных участка с разными наклонами, причем точка перегиба  $V_1$  на кривой 2 лежит вблизи значения напряжения, при котором происходило облучение.

Наличие двух прямолинейных участков на  $V_T(V_D)$  зависимостях свидетельствуют о том, что плотность ПС по длине канала можно аппроксимировать двумя участками с разным значением  $N_{ss}$  (вставка на рис. 3). При малых напряжениях на стоке выполняется условие  $a < L$ , где  $a$  – длина участка с высокой плотностью ПС  $N_{ss2}$ .

При высоких потенциалах на стоке имеет место  $a > L$  (второй участок), а наклон  $V_T(V_D)$  характеристики соответствует плотности  $N_{ss1}$ . Напряжение  $V_D = V_1$  соответствует условию  $a = L$  и может быть использовано для определения длины области с повышенной плотностью ПС вблизи стока.

Облучение МОПТ с напряжением на стоке приводит к появлению принципиально нового эффекта, который не проявляется при облучении той же дозой, но при отсутствии смещения на стоке, т.е. при  $V_D = 0$ .

На рис. 4 представлены ВАХ  $p$ -канального МОПТ, облученного со смещением на стоке. Обнаруживаются качественные различия ВАХ, измеренных при разных значениях  $V_d$  (кривые 1, 2). При больших напряжениях на стоке наблюдается не экспоненциальная, а более плавная степенная зависимость тока стока  $I_D$  от напряжения  $V_g$ , кроме того, появляется участок тока, слабо зависящий от напряжения на затворе.

Этот эффект – эффект «прокола» обусловлен протеканием тока в глубине полупроводника из-за снижения полем стока высоты потенциального барьера на переходе исток–подложка.

На вставке к рис. 4 приведено условное изображение распределения потенциала на  $p$ - $n$ - $p$  структуре исток–подложка–сток, иллюстрирующее этот эффект.



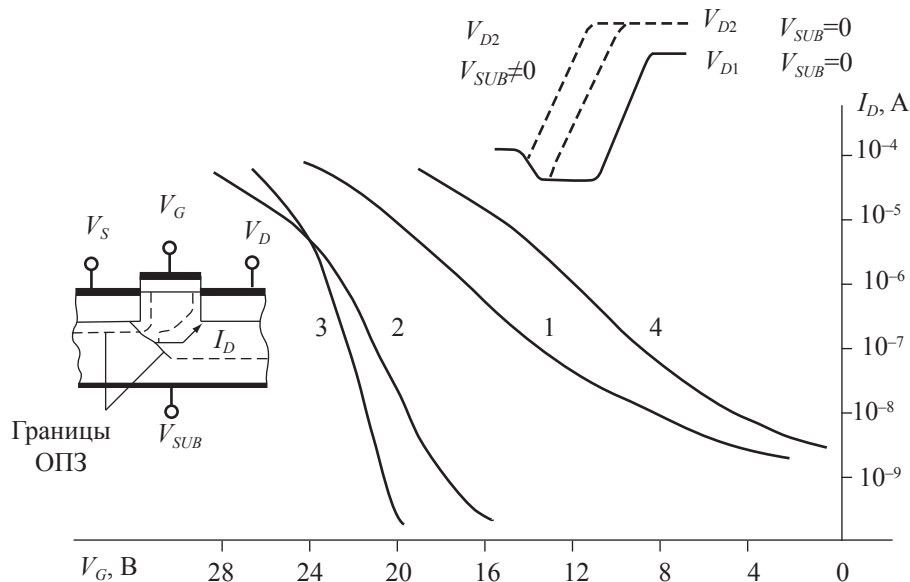


Рис. 4. Подпороговые ВАХ  $p$ -канальных МОПТ, облученных со смещением: 1)  $V_D = -16$  В,  $V_{SUB} = 0$  В; 2)  $V_D = -5$  В,  $V_{SUB} = 0$  В; 3)  $V_D = -16$  В,  $V_{SUB} = 5$  В; 4)  $V_D = -16$  В,  $V_{SUB} = 0$  В (облучена пристокковая область канала)

Индукцированное стоком снижение высоты потенциального барьера на истоке вызывает инжекцию неосновных носителей из истока в подложку и собирание их полем стока. Наблюдаемый эффект «прокола» является следствием повышенной плотности радиационно стимулированных ПС вблизи стока.

Проникновение поля стока вдоль границы раздела сдерживается за счет участия ПС в экранировании этого поля (вставка на рис. 3).

При этом изменяется форма области пространственного заряда, индуцируемого стоком. Также увеличивается расстояние от поверхности, на котором происходит понижение барьера истока. Протекание тока «прокола» в глубине полупроводниковой подложки характеризуется ослаблением влияния на этот ток напряжения затвора. В то же время подача обратного напряжения на подложку восстанавливает высоту потенциального барьера на истоке и тем самым подавляет ток «прокола». ВАХ, измеренные при подаче обратного смещения на подложку, имеют типичный для подпорогового тока вид (рис.4, кривая 3).

Проанализируем решение обратной задачи, т.е. возможность нахождения величин плотности ПС и эффективного заряда по подпороговым токам.

Для МОПТ с длинным каналом такая проблема решена [1, 3]. ВАХ в области под-

пороговых токов для длинноканальных приборов может быть выражена в явном виде как функция двух потенциалов смещения

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{q}{kTn}(V_G - V_T)\right) \times \left(1 - \exp\left(-\frac{qm}{kTn}V_D\right)\right), \quad (2)$$

где  $I_0$  – ток, измеряемый при  $V_G = V_T$  в режиме насыщения относительно напряжения на стоке ( $V_D \geq 3n/\beta m$ );

$n = (c_{ox} + c_D + c_{ss})/c_{ox}$ ;  $m = (c_{ox} + c_D)/c_{ox}$ ;

$c_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox}/d_{ox}$  – геометрическая емкость диэлектрика;

$c_{ss} = qN_{ss}$  – емкость ПС;

$$c_D = \left(\frac{\epsilon_{Si} q (N_A - N_D)}{2(\psi_s + V_{SUB}) - \beta^{-1}}\right)^{-1/2}$$

– емкость области пространственного заряда полупроводника.

Пример экспериментальной ВАХ МОПТ при различных смещениях на электродах приведен на рис. 4.

Плотность ПС рассчитывается из параметров крутизны  $S$  (или  $n = qS/kT$ ), характеризующих наклон ВАХ (2), построенной в координатах  $\ln(L_D/I_0) - V_G$ :

$$N_{ss} = (c_{ox}/q)(n - 1) - c_D/q. \quad (3)$$

Эффективный заряд в диэлектрике определяется по измеряемому значению порогового напряжения  $V_T$  и рассчитанному значению плотности ПС  $N_{ss}$

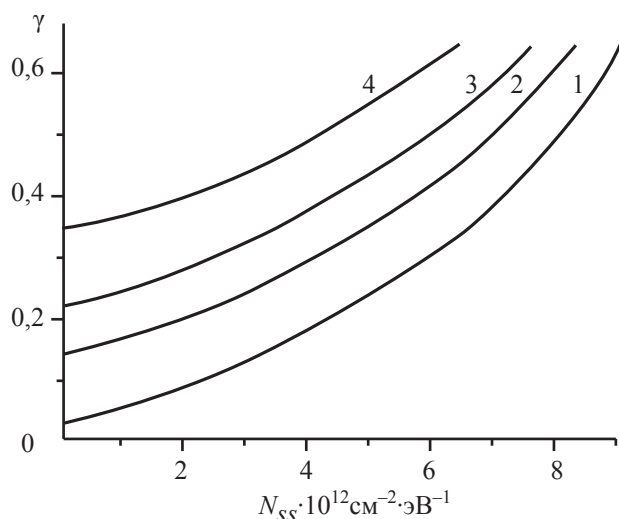


Рис. 5. Расчетная зависимость параметра  $\gamma$  (31) от плотности ПС  $N_{ss}$  для различных значений плотности заряда окисла  $Q_{or}$ ,  $cm^{-2}$ : 0 (1);  $10^{11}$  (2);  $10^{12}$  (3);  $2 \cdot 10^{12}$  (4)

$$Q_{ot} = Q_B^* - qN_{ss} \phi_B - c_{ox}(V_T - 2\phi_B), \quad (4)$$

где  $Q_B^*$  – объемный заряд полупроводника при  $\psi_s = 2\phi_B$ .

Для МОПТ с коротким каналом плотность ПС может быть также рассчитана по формуле (3). Однако определить  $Q_{ot}$  из уравнения (4) не представляется возможным из-за наличия зависимости порогового напряжения  $V_T$  от смещения на стоке  $V_D$ . Согласно результатам расчета, при равномерно распределенной плотности ПС по длине канала эта зависимость является линейной (1), а коэффициент пропорциональности  $\gamma$  определяется величинами  $Q_{ot}$  и  $N_{ss}$ .

На рис. 5 представлены зависимости параметра  $\gamma$  от плотности ПС, рассчитанные для различных  $Q_{or}$ . С использованием таких зависимостей значение эффективного заряда  $Q_{ot}$  может быть найдено по величинам  $\gamma$  и  $N_{ss}$ , определяемым из ВАХ в подпороговой области.

Представленное рассмотрение позволяет установить, что особенностью воздействия ионизирующего излучения на короткоканальные МДП-транзисторы является то, что основной причиной их деградации может явиться не только параметрический отказ

(изменение  $V_T$ ,  $S$  и т.д.), но и выход из строя вследствие появления радиационно-индуцированных токов утечек и пробоя, что приводит к увеличению токов потребления и нарушения теплового режима.

Условия данных процессов зависят от конструктивно-технологических особенностей приборов и должны определяться в каждом конкретном случае. Наличие ПС усиливает потенциал стока  $V_D$  и его влияние на  $V_T$  короткоканальных МОП-транзисторов, что обусловлено двумерным эффектом разделения заряда ПС на части, экранируемые стоком и затвором. Функциональная зависимость  $V_T$  от смещения на стоке определяется распределением плотности ПС по длине канала. Наличие повышенной плотности поверхностных состояний (ППС) вблизи стока приводит к снижению напряжения «прокола», появлению тока утечки, радиационно-индуцированного пробоя и «защелки» в КМОП-приборах. Эти эффекты могут явиться определяющими в деградации приборов с коротким каналом и должны учитываться при прогнозировании стойкости изделий к воздействию ионизирующих излучений. ППС и эффективный заряд в короткоканальных МДП-приборах могут быть определены из ВАХ, измеряемых в области подпороговых токов. ППС определяются и для длинноканальных приборов по наклону ВАХ в координатах  $\ln I_d - V_D$ , а эффективный заряд из сравнения экспериментальных ВАХ с расчетной, получаемой в результате двумерного численного решения системы уравнений, описывающих процессы токопереноса в транзисторе.

### Библиографический список

1. Першенков В.С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. – М.: Атомиздат, 1988.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984.
3. McWroter P. J., Winokur P. S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal – oxide – semiconductor – transistors // Appl. Phys. Lett.– 1986.-48(2).-P. 133

## СИСТЕМА ИМИТАЦИИ ДАТЧИКОВ РАБОЧЕГО МЕСТА КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

А.В. ЧЕРНЫШОВ, доц. каф. вычислительной техники МГУЛ, канд. техн. наук

*sch@mgul.ac.ru*

Датчики физических величин применяются в различных технических системах для измерения текущих параметров этих величин и представления измеренных значений в форме эквивалентного электрического сигнала.

При испытаниях и эксплуатации сложных подвижных объектов (автомобилей, самолетов, ракет, спутников) для сбора измерительной информации с датчиков, установленных на борту, и передачи этой информации на землю применяется бортовая аппаратура радиотелеметрических систем (БТА) [1].

Важнейшим условием качества процесса измерений является исправность БТА. Поэтому контролю состояния БТА при изготовлении, поставке и эксплуатации уделяется пристальное внимание.

Обычно для выполнения полноценного контроля необходимо выполнить проверки характеристик каждого измерительного канала БТА в нескольких точках измерительной шкалы. Для этого на вход канала надо последовательно подать тестовое воздействие, соответствующее показанию датчика в конкретной точке измерительной шкалы, и проконтролировать измерительный сигнал, полученный на выходе БТА.

Учитывая, что типичная современная БТА содержит до нескольких сотен (и даже тысяч) измерительных каналов, выполнять эти действия вручную нерационально.

Для автоматизации процесса контроля разработчиками БТА разрабатываются наземные компьютеризированные комплексы, получившие название рабочих мест контроля (РМК) [2]. Важной составляющей таких РМК являются управляемые имитаторы датчиков физических величин.

### Управляемый имитатор и его программирование

Обычно имитатор представляет собой аппаратный блок, позволяющий имитировать сразу группу однотипных датчиков (напри-

мер, аналоговых, сигнальных, быстропеременных и т. п.). Для управления уровнями имитируемых физических величин такой блок подключается к ПЭВМ, входящей в состав РМК.

Одной из важных проблем организации управления имитаторами датчиков является создание программного обеспечения, обеспечивающего, с одной стороны, подготовку управляющих данных в терминах предметной области, то есть позволяющих операторам задавать значения каждого имитируемого датчика в значениях физической величины, а с другой стороны, не требующего от операторов больших знаний о том, как перевести заданные имитируемые значения на язык аппаратуры имитатора датчиков и запрограммировать имитатор в соответствии с заданием операторов.

Обычно программирование имитатора сигналов сводится к загрузке в него управляющего бинарного блока данных. Формат этого блока и его размеры различны для имитаторов датчиков разного типа и зависят от возможностей имитатора и его назначения.

Но, как правило, в рамках РМК все (или большинство) имитаторы имеют унифицированный интерфейс подключения к ПЭВМ и однотипный протокол загрузки, что позволяет экономить ресурсы при разработке и эксплуатации имитаторов.

В силу перечисленных обстоятельств для выполнения процедуры собственно загрузки различных имитаторов датчиков управляющими данными полезна разработка отдельной (общей для всех имитаторов) программы, обеспечивающей процесс загрузки бинарных данных в указанный имитатор.

Таким образом, остается только вопрос подготовки бинарных управляющих данных для загрузки в имитатор. Для этой цели необходимо создание специализированного ПО поддержки имитатора.

### Требования к ПО подготовки данных

На практике большинство инженеров, разрабатывающих имитаторы, представляют себе такое ПО как красивое окошко в графическом интерфейсе операционной системы, в которое надо вписывать вручную шестнадцатеричные коды, соответствующие бинарной загружаемой программе. Автору многократно доводилось наблюдать такие решения на реальном производстве. При этом сами шестнадцатеричные коды рассчитываются вручную.

Однако с точки зрения сопровождения имитатора было бы гораздо удобнее иметь возможность указывать необходимые имитируемые уровни по каждому каналу имитатора непосредственно в значениях имитируемых физических величин или в процентах имитируемой измерительной шкалы БТА. При этом учитывая, что загрузка итогового бинарного управляющего блока данных, как показано выше, будет осуществляться самостоятельной программой, а кроме этого, необходимо иметь возможность легко документировать (записывать в конструкторскую документацию) исходные данные, необходимые для получения бинарных управляющих данных. Представляется уместным для задания исходных данных управления имитатором вместо создания графического интерфейса использовать специализированный язык программирования.

Язык задания имитируемых уровней должен относиться к типу проблемно-ориентированных, то есть ориентироваться на описание собственно имитируемых уровней, а не на процесс имитации. Реализация языка должна быть выполнена разработкой программ транслятора с языка в бинарный код и обратного декодера.

Для каждого типа имитатора должен быть создан свой язык, отражающий особенности задания исходных данных. Группа таких языков и разрабатываемых для них трансляторов и декодеров, обеспечивающих поддержку процессов управления всеми типами имитаторов датчиков, входящих в РМК, образуют самостоятельную программную систему – Систему имитации датчиков (СИД).

### Пример ПО управления имитатором

В качестве примера реализации языка СИД рассмотрим ПО имитатора аналоговых датчиков физических величин. Имитатор был разработан для рабочего места контроля (РМК) БТА «Орбита-IVMO» [3] и в настоящее время активно используется на заводе-изготовителе этой БТА.

Имитатор аналоговых датчиков (ИДА) представляет собой плату, вставляемую в корзину РМК. Один ИДА позволяет имитировать уровни 32-х аналоговых датчиков. Это соответствует количеству каналов в коммутаторе аналоговых сигналов МКА2 БТА «Орбита-IVMO».

Управление имитатором сводится к загрузке в него блока данных из 32-х слов. Каждое слово соответствует уровню имитации одного датчика. Между загрузками имитируемые уровни датчиков не изменяются. Имитатор может имитировать значения датчиков в пределах от 0 % до 100 % шкалы стандартных аналоговых датчиков.

Для подготовки исходных имитируемых данных предложен простой язык, соответствующий терминам предметной области имитации – программисту необходимо записать в файл с исходными данными 32 строки. В каждой строке указывается номер имитируемого канала и значение имитируемого уровня в процентах измерительной шкалы.

Задача подготовки блока данных на загрузку имитатора сводится к пересчету уровня имитируемого сигнала каждого датчика, заданного в процентах шкалы, в кодовый эквивалент ИДА и размещении этих данных в блоке в правильном порядке, ожидаемом аппаратурой имитатора.

ПО программирования ИДА включает в свой состав транслятор языка и декодер. Транслятор обеспечивает получение файла бинарного блока данных загрузки ИДА из файла с описанием уровней имитации в понятных испытателю процентах шкалы. Декодер обеспечивает обратное преобразование, что позволяет при необходимости проверить корректность трансляции или выяснить расстановку имитируемых уровней в бинарном блоке данных, на который отсутствует (поте-



рян) файл исходного задания. Так как имитируемые уровни в процентах обычно задаются с точностью до 0,01 %, то приняты особые меры к взаимно однозначному преобразованию файлов из одной формы в другую и обратно.

### Заключение

ПО, разработанное в рамках СИД, обеспечивает следующие возможности, чрезвычайно важные для серийного производства.

1. Простоту документирования. Уровни имитатора для каждого теста записываются в конструкторскую и технологическую документацию непосредственно в смысловой форме, что позволяет проконтролировать правильность составления документации любому инженеру-испытателю без дополнительных расчетов.

2. Однозначность процедуры получения бинарных управляющих данных имитатора, так как исходные данные для этого берутся непосредственно из документации без какого-либо преобразования.

3. Управляемость процедур хранения и применения файлов загружаемых бинарных данных, так как содержимое файлов может быть легко проверено декодированием.

4. Отсутствие ошибок загрузки имитатора при проведении тестов, так как оператору, проводящему тесты, не надо вводить с клавиатуры считанные из документации шестнадцатеричные коды. Ему достаточно загрузить готовый бинарный файл в имитатор с помощью стандартной программы загрузки.

### Библиографический список

1. Цифровые информационно-измерительные системы: Теория и практика / А.Ф. Фомин, О.Н. Новоселов, К.А. Победоносцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 448 с.
2. Чернышов, А.В. Программное обеспечение рабочего места контроля бортовой телеметрической аппаратуры: Монография / А.В. Чернышов. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 160 с.
3. Бортовая аппаратура «Орбита-IVMO», опыт ее производства и применения для натурной отработки ракет различных классов. / Л.Е. Горбатюк, С.Н. Недошвин, К.А. Победоносцев и др. // Радиотехнические тетради. – 2006. – № 33. – С. 30–34.

## ОБ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

П.С. СЕРЕБРЕННИКОВ, доц. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук

*serebrennikov@mgul.ac.ru*

Среди приемников на основе структур с пониженной размерностью приемники на основе нульмерных структур – квантовых точек (КТ) – считаются наиболее перспективными [1–7]. КТ, например нанокластер Ge в Si, из-за разрыва верха валентной зоны при переходе от Ge к Si является потенциальной ямой для дырок. Трехмерная потенциальная яма для движения носителей в КТ приводит к тому, что в отличие от приемника на сверхрешетках здесь нет поляризационных ограничений при приеме излучения. Как известно, при нормальном падении излучение в сверхрешетках не поглощается, поскольку вдоль слоев носители движутся как свободные. Нанесение на поверхность полупроводника дифракционной решетки, применение призм сильно усложняет технологию изготовления приборов, не приводя тем не менее к принци-

пиальному увеличению поглощения излучения. Представляет интерес расчет сечения фотоионизации, коэффициента поглощения приемников на КТ при различных поляризациях падающего излучения.

### Энергетический спектр квантовой точки

Характеристики фотоприемника на основе квантовых точек определяются прежде всего уровнями энергии дырок в КТ. В КТ типа «hut» высота много меньше латеральных размеров (в работе [5] получено, что высота КТ (нанокластер Ge в Si)  $\approx 1.5$  нм, а сторона основания  $\approx 15$  нм), поэтому расчетной моделью является кластер в виде диска (или «таблетки»). Задача имеет цилиндрическую симметрию, и поэтому оператор Лапласа в выражении для гамильтониана следует написать в цилиндрических координатах [8]:

$$\Delta = \frac{\partial}{\rho \partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\partial^2}{\rho^2 \partial^2 \varphi} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Волновая функция ищется соответственно в виде произведения функций, зависящих от  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$

$$\psi = e^{iM\varphi} f(\rho) g(z). \quad (2)$$

Число  $M$  должно быть целым, чтобы поворот на  $2\pi$  не приводил к другому значению функции. Движение вдоль оси цилиндра (вдоль  $z$ ) представляет собой движение в одномерной потенциальной яме. Для основного состояния  $g(z) \sim \cos kz$  при  $|z| \leq h/2$ ;  $h$  – высота кластера. Уровни энергии в яме определяются уравнением

$$\left(\cos \frac{kh}{2}\right)^2 = \frac{1}{\frac{m_2 \Delta E_v h^2}{2\hbar^2 \left(\frac{kh}{2}\right)^2} + \frac{m_1 - m_2}{m_1}} \operatorname{tg} \frac{kh}{2} \geq 0. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta E_v$  – разрыв верха валентной зоны при переходе от Ge к Si;  $m_1$ ,  $m_2$  – эффективные массы дырок в германии и кремнии соответственно. Поскольку эффективные массы дырок в Ge и Si значительно отличаются, для определения уровней энергии необходимо использовать уравнение (3), в котором явно учтено это обстоятельство. Энергия движения по  $z$  равна

$$E_z = \frac{2\hbar^2}{m_1 h^2} \left(\frac{kh}{2}\right)^2.$$

Решение уравнения (3) при  $h = 1,5$  нм,  $\Delta E_v = 0,55$  эВ,  $m_1 = 0,3m_0$ ,  $m_2 = 0,5m_0$  дает  $kh/2 = 0,998$ . Энергия основного состояния над дном ямы при этом  $E_z = 225,3$  мэВ.

Для функции  $f(\rho)$  получается уравнение

$$f'' + \frac{f'}{\rho} + \left[ \frac{2m_1}{\hbar^2} E - k^2 - \frac{M^2}{\rho^2} \right] f(\rho) = 0. \quad (4)$$

При переходе к переменной

$$\chi = \left( \frac{2m_1}{\hbar^2} E - k^2 \right)^{0,5} \rho$$

получается уравнение Бесселя 1 рода  $M$ -ого порядка

$$f'' + \frac{f'}{\chi} + \left[ 1 - \frac{M^2}{\chi^2} \right] f = 0. \quad (5)$$

Для  $|z| \leq h/2$ ,  $\rho \leq \rho_0$  волновая функция имеет вид

$$\cos kz \cdot J_M(\rho \sqrt{a}) e^{iM\varphi},$$

где  $\rho_0$  – радиус кластера;

$M$  – целое число;

$J_M$  – функция Бесселя первого рода,  $M$  порядка;

$$a = \frac{2m_1}{\hbar^2} E - k^2.$$

При  $\rho \geq \rho_0$  волновая функция есть  $K_M(\rho \sqrt{b})$  – модифицированная функция Бесселя второго рода,  $M$ -го порядка;

$$b = \frac{2m_2}{\hbar^2} (\Delta E_v - E) + k^2.$$

Сшивая волновые функции и их производные, при  $\rho = \rho_0$  получаем энергии состояний дырки в цилиндрическом кластере над дном ямы

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_1} + \frac{\hbar^2 y_q^2(M)}{2m_1 \rho_0^2}. \quad (6)$$

Здесь:  $\hbar^2 k^2 / 2m_1$  – энергия движения вдоль оси кластера;  $y_q(M)$  – корни уравнения

$$F_M(y) = 0 \quad y = \rho_0 \sqrt{a}. \quad (7)$$

Функция  $F_M(y)$  равна

$$F_M = J_M(y) - \frac{K_M(y \sqrt{\frac{b}{a}})}{K'_M(y \sqrt{\frac{b}{a}})} \sqrt{\frac{a}{b}} J'_M(y), \quad (8)$$

где  $K'_M$ ,  $J'_M$  – производные по аргументу от соответствующих функций.

В работе [9] энергия движения по  $\rho$  и  $\varphi$  находилась из условия  $J_M(\rho_0 \sqrt{a}) = 0$ . Более точным является использование уравнения (7), так как здесь учитываются затухающие части волновой функции, что важно при вычислении матричного элемента фотоионизации. Корни уравнения  $F_M(y) = 0$  находятся левее (меньше по величине) соответствующих корней уравнения  $J_M(y) = 0$ . Учет затухающих частей волновых функций приводит, таким образом, к понижению энергии уровня, причем для более высоких уровней величина этого сдвига больше. Энергии ряда состояний с различными  $M$  и  $q$  приведены в таблице.

В скобках приведена энергия состояния с теми же значениями  $M$  и  $q$ , вычисленными как в [9] из условия  $J_M(\rho_0 \sqrt{a}) = 0$ ; в последнем столбце дана граничная длина волны фотоионизации соответствующего состояния. В расчете радиус нанокластера принят равным 7 нм, остальные параметры прежние.

Т а б л и ц а  
Энергетический спектр квантовой точки  
(нанокластер – «таблетка»)

$M$	$q$	$E$ , мэВ	$\lambda$ , мкм
0	1	238,1 (240,3)	4
	2	292 (304,4)	4,8
	3	384,37 (419,8)	7,5
1	1	257,7 (263,4)	4,25
	2	332 (353)	5,7
2	1	283,26 (293,8)	4,66
	2	376,5 (409,3)	7,2

**Сечение фотоионизации КТ**

Для вычисления коэффициента поглощения ИК-излучения в гетеросистеме с КТ необходимо определить квантово-механическую вероятность выброса дырки с уровня в нанокластере германия в валентную зону в кремнии при поглощении ИК фотона. Вероятность выброса дырки в единицу времени из одной КТ дается [8] формулой

$$w = \frac{\pi}{(2\pi\hbar)^3 \hbar} |M_{0\bar{p}}|^2 (2m_2)^{3/2} \sqrt{\hbar\omega - I}. \quad (9)$$

Здесь  $\hbar\omega$  – энергия фотона;  $I$  – энергия ионизации уровня;  $m_2$  – эффективная масса дырки в кремнии;  $M_{0\bar{p}}$  – матричный элемент энергии взаимодействия дырки с электромагнитным полем, взятый между начальным состоянием (уровень в КТ) и свободной дыркой с импульсом  $p$ . За начальное состояние принимается основное состояние дырки в нанокластере – «таблетке». Матричный элемент  $M_{0\bar{p}}$  имеет вид

$$M_{0\bar{p}} = \frac{1}{\sqrt{V}} \int e\vec{E}\vec{r}\psi_0 e^{i\vec{p}\vec{r}/\hbar} d\vec{r}, \quad (10)$$

где  $V$  – нормировочный объем.

Рассмотрим вид матричного элемента для двух поляризаций электромагнитного излучения:  $E \parallel z$  ( $E$  параллельно оси кластера) и  $E \perp z$  ( $E$  перпендикулярно оси кластера). Обозначим соответствующие матричные элементы как  $M_z$  и  $M_p$ . Первый случай соответствует падению ТМ волны при угле падения, близком к  $\pi / 2$ . Второй случай соответствует нормальному падению излучения (движение волны вдоль оси  $z$ ). За основное состояние принимается симметричная волновая функция движения по  $z$  и состояние с  $M = 0$  и  $q = 1$ . В результате доволь-

но длинных выкладок получаем следующие выражения для  $M_p$  и  $M_z$

$$M_p = 4\pi eEN_n \cos(\varphi - \varphi') \left[ \int_0^{h/2} \cos kz \cos\left(\frac{p \cos \theta'}{\hbar} z\right) \times \right. \\ \left. \times dz + \cos \frac{kh}{2} e^{\frac{\chi h}{2}} \int_{h/2}^{\infty} e^{-\chi z} \cos\left(\frac{p \cos \theta'}{\hbar} z\right) dz \right] \times \\ \times \left[ \int_0^{\rho_0} J_1\left(\frac{p \sin \theta'}{\hbar} \rho\right) J_0(\rho\sqrt{a}) \rho^2 d\rho + \right. \\ \left. + \frac{J_0(\rho_0\sqrt{a})}{K_0(\rho_0\sqrt{b})} \int_{\rho_0}^{\infty} J_1\left(\frac{p \sin \theta'}{\hbar} \rho\right) K_0(\rho\sqrt{b}) \rho^2 d\rho \right]. \quad (11)$$

$$M_z = 4\pi eEN_n \left[ \int_0^{h/2} z \cos kz \sin\left(\frac{p \cos \theta'}{\hbar} z\right) dz + \right. \\ \left. + \cos \frac{kh}{2} e^{\frac{\chi h}{2}} \int_{h/2}^{\infty} z e^{-\chi z} \sin\left(\frac{p \cos \theta'}{\hbar} z\right) dz \right] \times \\ \times \left[ \int_0^{\rho_0} J_0\left(\frac{p \sin \theta'}{\hbar} \rho\right) J_0(\rho\sqrt{a}) \rho d\rho + \right. \\ \left. + \frac{J_0(\rho_0\sqrt{a})}{K_0(\rho_0\sqrt{b})} \int_{\rho_0}^{\infty} J_0\left(\frac{p \sin \theta'}{\hbar} \rho\right) K_0(\rho\sqrt{b}) \rho d\rho \right]. \quad (12)$$

Здесь  $p$  – импульс выброшенной дырки

$$p = \sqrt{2m_2(\hbar\omega - I)}; \chi = k \operatorname{tg}(kh/2);$$

$\varphi$  – угол между вектором  $\vec{E}$  и осью  $x$ ;  $\theta'$  – угол между импульсом дырки и осью  $z$ ;  $\varphi'$  – угол между проекцией импульса дырки на плоскость  $xOy$  и осью  $x$ ; поскольку за начальное состояние принято состояние  $M = 0$  и  $q = 1$  произведение  $\rho_0\sqrt{a}$  равно первому корню уравнения  $F_0(y) = 0$ ;  $N_n$  – нормировочный множитель, который определяется из условия

$$\int |\psi_0(\rho, \varphi, z)|^2 \rho d\rho d\varphi dz = 1. \quad (13)$$

Для краткости введем обозначения

$$M_p = 4\pi eEN_n \cos(\varphi - \varphi') I_p \text{ и } M_z = 4\pi eEN_n I_z. \quad (14)$$

При получении выражений для  $M_z, M_p$  было использовано разложение  $e^{i\gamma \cos \varphi}$  в ряд

$$e^{i\gamma \cos \varphi} = J_0(\gamma) - 2J_2(\gamma) \cos(2\varphi) + 2J_4(\gamma) \cos(4\varphi) + \dots + i[2J_1(\gamma) \cos(\varphi) - 2J_3(\gamma) \cos(3\varphi) + \dots]. \quad (15)$$

Из формул (11), (12) следует, что вероятность выброса дырки с импульсом перпендикулярным вектору  $E$  равна 0 ( $M_z = 0$  при  $\theta' = \pi / 2$  и  $M_p = 0$  при  $\theta' = 0$ ).

Вычисление  $M_z, M_p$  производится на компьютере. Чтобы найти вероятность фотоионизации необходимо усреднить  $|M_z|^2$  и  $|M_p|^2$  по различным направлениям импульса вы-

брошенной дырки. Усреднение производится численно по формуле

$$\bar{F} = \frac{1}{4\pi} \int F(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (16)$$

Сравним вероятности фотоионизации для двух поляризаций, т.е., иначе говоря, найдем отношение  $|\bar{M}_z|^2 / |\bar{M}_p|^2$  для ряда длин волн. Расчет дает  $\lambda$  (мкм) 0.5 1.0 2.0 3.0 3.5 3.8

$$|\bar{M}_z|^2 / |\bar{M}_p|^2 \quad 0,15 \quad 0,276 \quad 0,1 \quad 0,047 \quad 0,02 \quad 7 \cdot 10^{-3}.$$

Параметры, использованные в расчете  $m_1 = 0,3m_0$ ,  $m_2 = 0,5m_0$ ,  $\Delta E_v = 0,55$  эВ,  $h = 1,5$  нм,  $r_0 = 7$  нм. Из проведенного анализа следует, что вероятность фотоионизации излучением с вектором  $E||z$  меньше вероятности фотоионизации при нормальном падении (эта вероятность определяется матричным элементом  $M_p$ ). Следует отметить, что возможно и обратное соотношение между  $|\bar{M}_z|^2$  и  $|\bar{M}_p|^2$ . Расчет показывает, что такое соотношение имеет место при длинах волн, когда оба матричных элемента очень малы, и поэтому этот случай, по-видимому, не представляет практического интереса.

Рассмотрим теперь излучение, падающее на систему КТ под произвольным углом  $\beta$ . В случае ТЕ волны (вектор  $E$  перпендикулярен плоскости падения) вероятность фотоионизации определяется матричным элементом  $|\bar{M}_p|^2$  и не зависит от угла падения. Для ТМ волны разложение вектора  $E$  дает  $E_z = E \sin\beta$  и  $E_p = E \cos\beta$  и соответственно усредненное значение матричного элемента

$$|M_{TM}(\beta)|^2$$

будет равно

$$|M_{TM}(\beta)|^2 = \cos^2\beta |\bar{M}_p|^2 + \sin^2\beta |\bar{M}_z|^2. \quad (17)$$

Отношение вероятности фотоионизации ТМ излучением, падающим под углом  $\beta$ , к вероятности фотоионизации ТЕ излучением будет

$$\begin{aligned} \frac{|M_{TM}(\beta)|^2}{|\bar{M}_p|^2} &= \frac{\sin^2\beta |\bar{M}_z|^2 + \cos^2\beta |\bar{M}_p|^2}{|\bar{M}_p|^2} = \\ &= \cos^2\beta + \sin^2\beta |\bar{M}_z|^2 / |\bar{M}_p|^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Вероятность фотоионизации КТ в единицу времени принимает вид

$$w_{z,p} = \frac{2e^2 E^2 (2m_2)^{3/2}}{\hbar^4} N_n^2 \bar{I}_{z,p}^2 \sqrt{\hbar\omega - I}. \quad (19)$$

Выражаем  $E^2$  через плотность потока фотонов  $S$  [ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ] с энергией  $\hbar\omega$

$$n_r E^2 c / 8\pi = \hbar\omega S, \quad (20)$$

где  $c$  – скорость света;

$n_r$  – показатель преломления.

После этого получаем окончательное выражение для вероятности фотоионизации КТ ИК излучением

$$w_{z,p} = \frac{16\pi e^2 (2m_2)^{3/2}}{\hbar^4 c n_r} N_n^2 \bar{I}_{z,p}^2 \hbar\omega (\sqrt{\hbar\omega - I}) S. \quad (21)$$

Сечение фотоионизации КТ будет

$$\sigma_{z,p} = \frac{16\pi e^2 (2m_2)^{3/2}}{\hbar^4 c n_r} N_n^2 \bar{I}_{z,p}^2 \hbar\omega \sqrt{\hbar\omega - I}. \quad (22)$$

Пусть в единице объема (многослойная гетероструктура Ge-Si) имеется  $N_{qd}$  одинаковых КТ. Можно ввести коэффициент поглощения ИК-излучения в гетероструктуре Ge-Si с квантовыми точками. Коэффициент поглощения  $\alpha$  [ $\text{см}^{-1}$ ] будет равен произведению сечения фотоионизации на объемную плотность КТ. Коэффициент поглощения  $\alpha$  [ $\text{см}^{-1}$ ] будет равен

$$\alpha_{z,p} = \frac{16\pi e^2 (2m_2)^{3/2}}{\hbar^4 c n_r} N_n^2 \bar{I}_{z,p}^2 \hbar\omega \sqrt{\hbar\omega - I} N_{qd}. \quad (23)$$

Множитель  $\sqrt{\hbar\omega - I}$  отражает плотность конечных состояний дырок, выброшенных из нанокластера. Определяющей, однако, оказывается зависимость матричного элемента от импульса свободной дырки. Малая величина матричного элемента и, следовательно, вероятность перехода в состояние с большой конечной энергией связаны с быстрой осцилляцией волновой функции конечного состояния ( $\psi_p \propto e^{ipr/\hbar}$ ). Сечение фотоионизации основного состояния КТ ( $M = 0$ ,  $q = 1$ ) излучением падающим вдоль оси  $z$  (нормальное падение) с  $\lambda = 3,8$  мкм равно  $9,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . В расчете использованы прежние параметры структуры. При слоевой плотности КТ  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , как в [5], коэффициент поглощения излучения будет приближенно равен  $250 \text{ см}^{-1}$ .

### Заключение

Проведен численный расчет энергетического спектра дырок для КТ в виде таблетки. Учтено различие эффективных масс дырок в нанокластере и матрице и затухающей части волновой функции. Получена большая разли-



ца в величине матричного элемента, сечении фотоионизации для случаев электрического вектора волны вдоль и поперек оси кластера. Показано, что система КТ в отличие от сверхрешеток обладает высокой чувствительностью при нормальном падении излучения.

### Библиографический список

1. Choi K.K. // Proc. SPIE. 2002. V. 4646, p.79.
2. H.C.Liu, S.Fafard, R.Dudek, Z.R.Wasilevski. Proc. SPIE, 4646, p.58(2002).
3. H.C.Liu, M.Gao, J.McCaffrey, Z.R.Wasilevski, S.Fafard. Appl. Phys. Lett., 78, N1, p.79(2001).
4. Shih-Yen Lin, Yao-Jen Tsai, Si-Chen Lee. Jpn. J. Appl. Phys., 40, p.L 1290(2001).
5. A.I.Yakimov, A.V.Dvurechenskii, A.I.Nikiforov, Yu.Yu.Proskuraykov. J.Appl. Phys.v.89,N 10, p.5676 (2001).
6. Пчеляков, О.П., Болховитянов Ю.Б., Двуреченский А.В., Соколов Л.В., Никифоров А.И., Якимов А.И., Фойхтлендер Б. ФТП, 34, в.11, с.1281(2000).
7. V.Ryzhii. Semicond. Sci. Technol. 11, p.759(1996).
8. Ландау, Л.Л. Теоретическая физика. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Л. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1989. – Т. 3.
9. Зегря, Г.Г., Константинов О.В., Матвеевцев А.В. ФТП, т. 37, в. 3, с. 334 (2003).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ БОРТОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. ШУЛЬЦ, *проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,*  
В.Н. ХАРЧЕНКО, *проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук*

*caf-physics@mgul.ac.ru*

Уникальные свойства ТТ побуждают многих исследователей рассматривать их в качестве эффективных теплообменных устройств для управления тепловыми потоками при обеспечении необходимых температурных режимов БЭС. Применение жидкометаллических ТТ позволяет увеличить удельные тепловые потоки и значительно расширить температурный диапазон их применения. Запуск жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя представляет собой самый ответственный этап их работы. Вымораживание и прекращение циркуляции жидкого теплоносителя может привести к осушению фитиля испарителя и прожогу стенки ТТ. Потеря работоспособности ТТ в этот период может привести к выходу из строя всей БЭС. В данной работе приводятся результаты решения обратной задачи нестационарной теплопроводности. В основу решения положены экспериментально измеренные нестационарные температурные поля, полученные при запуске жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя (натрия).

### 1. Эксперимент

#### 1.1. Объекты исследования

Объектом исследования явились две натриевые тепловые трубы диаметром 48 мм:

№1 – длиной 1800 мм с газовым наполнением, давление неконденсируемого газа (НКГ – аргона) порядка 133 Па, длиной зоны испарения – 250 мм; №2 – вакуумная труба (без НКГ) длиной 1825 мм, длиной зоны испарения – 278 мм [1]. Испытания тепловых труб проводились в вакуумной камере при горизонтальном расположении ТТ. Нагрев зоны испарения осуществлялся с помощью электронагревателя радиационного типа, обеспечивающего выход ТТ на уровень температур до 800 °С. Для исключения воздействия нагревателя на зону конденсации ТТ в конце зоны испарения была установлена экранно-вакуумная изоляция из 3-х слоев металлической фольги. Первый слой экранов выполнен из ниобиевого сплава, остальные – из X18H10T. Суммарная толщина экранно-вакуумной изоляции не превышала 1,5 см. Отвод тепла от зоны конденсации осуществлялся излучением на охлаждаемые водой стенки вакуумной камеры. Обе трубы имели составной фитиль, образованный кольцевым зазором, для протока жидкого теплоносителя под экраном. Экран фитиля был выполнен из нержавеющей сетки саржевого плетения № 120/670 ГОСТ 3187-65. Общими для каждой из этих труб являются следующие геометрические размеры: диаметр пор экрана фитиля – 120 мкм, кольцевой зазор под экра-

ном для протока теплоносителя – 0,5 мм. Материал корпуса – ниобий.

### 1.2. Система измерений

Температура стенки ТТ контролировалась вольфрам-рениевыми термопарами, расположенными на наружной поверхности трубы. Корольки термопар приваривались к стенке трубы и закрывались экраном. Показания термопар автоматически регистрировались информационно-измерительной системой (ИИС) с шагом 1,56 с. Схема размещения термопар на ТТ № 1 и ТТ №2 представлена на рис. 1 и 2.

Погрешность измерений температуры, вносимая измерительной аппаратурой, составляла ± 0,5 %. Методическая погрешность измерений, обусловленная теплообменом королька термопар, составляла ± 2 %.

Электрическая мощность нагревателя контролировалась по показаниям вольтметра Д-569 Кл. 0,5 и амперметра Э– 514 с шунтом  $J = 7,5A$ , Кл. 0,5.

Тепловая мощность, передаваемая ТТ, определялась по теплоотводу с конденсатора. Тепловая нагрузка  $Q_k$  определялась

$$Q_k = Q_{\text{тк}} + Q_{\text{пк}}$$

где  $Q_{\text{тк}}$  – тепло, отведенное в теплообменник конденсатора;

$Q_{\text{пк}}$  – потери тепла в корпусе установки.

Тепло  $Q_{\text{тк}}$ , отведенное в щелевой теплообменник конденсатора, рассчитывалось по расходу воды и разности температур охлаждающей воды на выходе  $t_{o \text{ вых}}$  и входе  $t_{o \text{ вх}}$ :

$$Q_{\text{тк}} = G_{\text{в}} C_{\text{в}} \Delta t_{\text{ов}}$$

### 1.3. Результаты экспериментального исследования

На рис. 1 и 2 представлены результаты экспериментальных исследований. Была проведена серия запусков ТТ из замороженного состояния теплоносителя при скачкообразном установлении мощности радиационного нагревателя от 0,5 до 11 кВт. Было установлено, что тщательно очищенная от посторонних примесей и неконденсируемых газов ТТ успешно запускалась при удельном теплоподводе к испарителю до 300 кВт/м<sup>2</sup>.

При добавлении небольшого количества НКГ (аргона), для обеспечения фронтального запуска и предотвращения вымораживания теплоносителя в конденсаторе, происходил срыв запуска при значительно меньшем удельном теплоподводе ≈ 50кВт/м<sup>2</sup>.

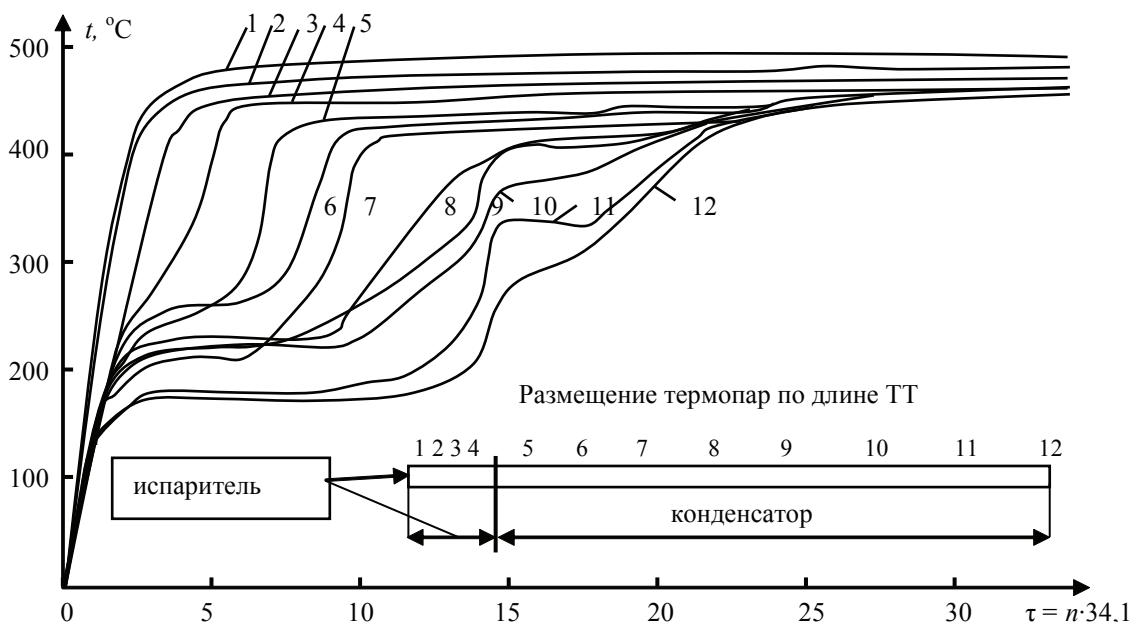


Рис. 1. Нестационарное распределение температур по длине натриевой ТТ при скачкообразном установлении мощности электрического нагревателя  $N = 3,675$  кВт: данные работы [1]. Запуск ТТ из замороженного состояния теплоносителя: 1–4 – номера термопар, расположенных в зоне испарения; 5–12 – в зоне конденсации;  $t$ , °С,  $\tau$  – время, с;  $n$  – цикл измерения

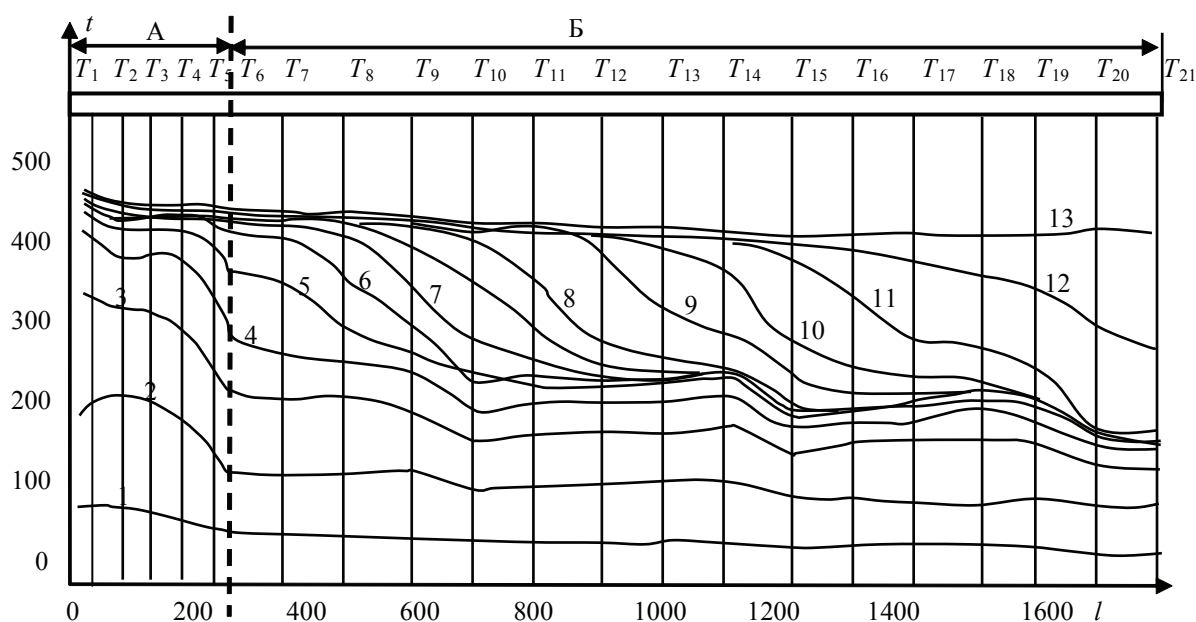


Рис. 2. Нестационарные распределения температур по длине вакуумной натриевой ТТ при скачкообразном установлении электрической мощности нагревателя  $N = 3,67$  кВт, данные работы [1]. Запуск из замороженного состояния теплоносителя: А – зона испарения; Б – зона конденсации; 1 –  $\tau = 0$ ; 3 – 32, 2 – 62, 4 – 125, 5 – 157, 6 – 219, 7 – 282, 8 – 345, 9 – 376, 10 – 439, 11 – 502, 12 – 785, 13 – 1570,  $\tau$ , с;  $l$ , мм;  $t$ , °C

## 2. Результаты решения обратной задачи нестационарной теплопроводности

Экспериментально измеренные нестационарные распределения температур на внешней поверхности жидкометаллической ТТ были использованы в качестве исходных данных для решения обратной задачи нестационарной теплопроводности, из которой были получены необходимые для анализа гидродинамики и структуры парового потока характеристики:  $\rho_1 V_1$ , [кг/м<sup>2</sup>с] – массовая скорость испарения (конденсации),  $\rho_1 U_1$  – массовая осевая скорость,  $Re_o$ ,  $Re_r$  – осевое и радиальное числа Рейнольдса,  $M$  – число Маха, а также температура  $T_1$  и давление пара  $P_1$ , [2].

Для расчета указанных характеристик были использованы двумерные уравнения сохранения массы паровой фазы в форме уравнения неразрывности сжимаемой жидкости и уравнение энергии для сжимаемой невязкой жидкости, которые имеют вид

$$(\partial \rho_1 / \partial \tau) + (\partial / r \partial r) (\rho_1 r V_1) + (\partial / \partial x) (\rho_1 U_1) = 0, \quad (1)$$

$$\rho_1 C_{v1} ((\partial T_1 / \partial \tau) + V_1 (\partial T_1 / \partial r) + U_1 (\partial T_1 / \partial x)) = \lambda_1 [(\partial / r \partial r) r (\partial T_1 / \partial r) + (\partial^2 T_1 / \partial x^2)]. \quad (2)$$

Здесь и ниже индекс 1 относится к паровой фазе, 2 – к жидкой фазе, 3 – к твердой

фазе (корпус ТТ), остальные обозначения являются общепринятыми;  $C$  – теплоемкость, Дж/кгК.

Система уравнений (1–2) интегрировалась по  $r$  при следующих допущениях:  $\partial \rho_1 / \partial \tau$  и  $U_1$  не зависят от  $r$ ;  $V_1$  не зависит от  $x$ ; профили температуры и скорости являются квадратичными параболой от  $r$ . Таким образом, система (1–2) сводилась к одномерным уравнениям с дополнительными источниками тепла и массы и решалась при граничных условиях третьего рода, в состав которых входили измеренные температурные поля (рис. 1, 2).

Решение задачи проводилось при следующих предположениях:

1. Пар представляет собой равновесную смесь идеального газа и жидкости.
2. Объемом жидкой фазы пренебрегается.
3. Испарение и конденсация происходят только на поверхности раздела фаз.
4. Выбор времени  $\tau = 0$  соответствует расплавленному состоянию теплоносителя.

При пуске ТТ из замороженного состояния теплоносителя труба последовательно проходила различные режимы течения парового потока, рис. 1.

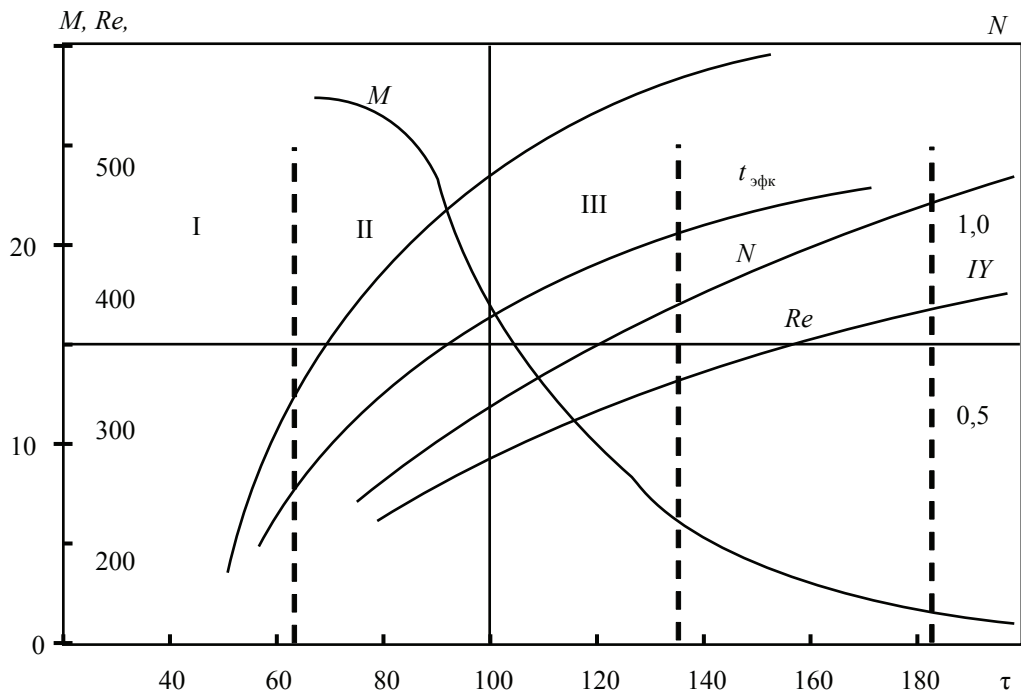


Рис. 3. Изменение основных характеристик теплопереноса в натриевой ТТ при пуске из замороженного состояния теплоносителя. Электрическая мощность нагревателя установлена скачкообразно  $N_{эл} = 3,67$  кВт.  $N$  – тепловая мощность, отведенная излучением с конденсатора, кВт; число Маха –  $M$  и число Рейнольдса –  $Re$  определены по параметрам парового потока на выходе из испарителя;  $t_{эф.н}$  – эффективная температура нагревателя;  $t_{эф.к}$  – эффективная температура конденсатора;  $I$  – область свободно-молекулярного течения,  $II$  – область переходных режимов,  $III$  – область течения со скольжением,  $IV$  – область сплошного течения;  $t$ , °С;  $\tau$ , с.

При низких плотностях пара,  $t < 180$  °С, имел место свободно-молекулярный режим течения, характеризуемый числом Кнудсена  $Kn = l/d_n \geq 1$  ( $l$  – длина свободного пробега, м). По известным из расчета числам Маха и Рейнольдса была определена верхняя граница свободно-молекулярного течения  $Kn = M/Re = 3$ , (область  $I$ , рис. 1). Переходная область  $II$  находилась между режимом течения со скольжением (область  $III$ ) и свободно-молекулярным течением (область  $I$ ). Нижняя граница течения со скольжением определялась по условию

$$Kn = M / \sqrt{Re} = 10^{-2},$$

а верхняя – по условию

$$Kn = M / \sqrt{Re} = 10^{-1}.$$

Нижней границе соответствовала  $t \approx 370$  °С, верхней  $t \approx 400 - 425$  °С. Выше области течения со скольжением находилась область  $IV$  – область течения пара как сплошной среды.

Присутствие неконденсируемых газов (НКГ) в парожидкостном тракте значительно

ухудшало пусковые и динамические характеристики ТТ.

Так, например, при добавлении в паровой тракт аргона в количестве, соответствующем парциальному давлению перед пуском  $P_{нкг} = 30$  мм  $Hg$ , происходил срыв запуска при скачкообразном установлении мощности нагревателя 1900 Вт. Таким образом, экспериментально установлено, что добавление в паровой канал НКГ, с целью обеспечения фронтального запуска и предотвращения вымораживания теплоносителя, ухудшало пусковую динамику ТТ.

В то же время тщательно очищенная от посторонних примесей и НКГ натриевая ТТ восстанавливала работоспособность после кратковременного перегрева зоны испарения при скачкообразном переходе на повышенный уровень мощности (с 0,8 кВт на уровень 1,7 кВт).

Процессы запуска и переходов на повышенные уровни мощности моделировались в низкотемпературной ТТ. Для этой цели



была изготовлена плоская ТТ с боковыми прозрачными стенками и составным фитилем, конструктивно совпадающим с конструкцией фитиля исследуемой натриевой ТТ. Была проведена визуализация течения с помощью прибора Теплера и методом «световой нож». Обнаружены частицы жидкой фазы в паровом потоке. Установлено, что частицы попадают в паровой поток за счет колебаний менисков в фитиле испарителя. Наличие жидкой фазы в паровом потоке существенно облегчало процесс гетерогенно-гомогенной объемной конденсации. Были получены, с помощью интерферометра Маха-Цендера, интерферограммы течения паров ацетона [4]. Обнаружен скачок конденсации на выходе из испарителя при пуске ТТ. Расшифровка интерферограмм показала, что процесс объемной конденсации в паровом потоке инициирован ядрами – зародышами (частицами жидкости), выброшенными в паровой поток из фитиля испарителя. Наличие частиц жидкой фазы в паровом потоке вызывало дополнительное гидравлическое сопротивление и приводило к непроизводительной затрате работы капиллярных сил фитиля. Этот процесс ограничивает максимально достижимый теплоперенос и ухудшает пусковую динамику ТТ.

Визуализация треков частиц жидкой фазы методом «световой нож» позволила выявить в испарителе поперечные валы (вихри). В конденсаторе обнаружены продольные валы. На границе смены воздействия (испаритель – конденсатор) обнаружена устойчивая вихревая структура в виде поперечного вала, вращавшаяся по направлению вдув – отток. Наличие такой структуры на выходе из испарителя уменьшало проходное сечение парового канала и создавало дополнительное гидравлическое сопротивление.

## Заключение

Установлено, что жидкометаллические ТТ имеют удовлетворительную пусковую динамику при их запуске из замороженного состояния теплоносителя. Условием успешного запуска и безопасных переходов на повышенный уровень мощности является тщательная очистка парожидкостного тракта от посторонних примесей и следов неконденсируемых газов. Применение жидкометаллических ТТ в качестве сверхпроводников тепла позволяет решить задачи управления и стабилизации температурных режимов бортовых энергетических систем.

## Библиографический список

1. Шульц, А.Н. Исследование нестационарного тепло- и массообмена в жидкометаллических тепловых трубах / А.Н. Шульц, П.И. Быстров, В.Ф. Гончаров, В.Н. Харченко // Теплообмен – УИ: Материалы УИ всесоюзной конференции по теплообмену. – Минск: ИТМО АН БССР, 1980. – Т. IV. – С. 94–99.
2. Шульц, А.Н. Определение скоростей испарения и конденсации по длине тепловой трубы в нестационарных условиях / А.Н. Шульц, Б.П. Захаров: научные труды. – М: МЛТИ, 1981. – Вып. 138. – С. 57–62.
3. Шульц, А.Н. Восстановление работоспособности тепловой трубы / А.Н. Шульц // Электроника и счетно-решающая техника в лесной и деревообрабатывающей промышленности: научные труды. – М.: МЛТИ, 1980. – Вып. 129. – С. 173–176.
4. Shults, A.N. On physical mechanisms of heat, mass and momentum transfer in short low-temperature heat pipe. I. Hydrodynamic of flow vapour / A.N. Shults, P.I. Bystrov, V.N. Kharchenko // Heat – Transfer/Soviet Research (USA), 1993. – P. 5–12.
5. Shults, A.N. On physical mechanisms of heat, mass and momentum transfer in short low-temperature heat pipe. II. Vapour flow structure / A.N. Shults, P.I. Bystrov, V.N. Kharchenko // Heat – Transfer/Soviet Research (USA), 1993. – P. 258–266.

## НЕЛОКАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ДИСКРЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ

Н.В. ЗВЕРЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук

caf-physics@mgul.ac.ru

Модели элементарных частиц – фермионов – в дискретном пространстве-времени (на решетке) используют для расчетов физических характеристик частиц во всей области их параметров [2]. Для необходимой инвариантности характеристик фермионов относительно операции изменения знака времени у волновых функций этих частиц используют нелокальную дискретную производную [3].

Но прямая замена непрерывных производных на нелокальные дискретные приводит к несогласию дискретной и непрерывной моделей в случае бесконечного дискретного пространства-времени [4]. Для устранения этого несогласия в таком пространстве-времени предложено добавить вспомогательные нефизические частицы [5]. Однако исследования моделей в конечном дискретном пространстве-времени (на конечной решетке) не были выполнены.

В данной работе приведены результаты исследований [1] векторной и киральной нелокальных моделей фермионов со вспомогательными частицами на двумерной ( $2d$ ) конечной решетке на согласие с непрерывными теориями.

### Векторная модель фермиона на решетке без вспомогательных частиц в однородном внешнем поле

Фундаментальная величина данной модели – действие – имеет вид [4]

$$S_{VS} = S[\Psi, U, 0].$$

Здесь

$$S[\Psi, U, m] = \sum_{x,y} \bar{\Psi}_x \mathbf{M}_{xy}[U, m] \Psi_y, \quad \mathbf{M}_{xy}[U, m]$$

– фермионная матрица

$$\mathbf{M}_{xy}[U, m] = \sum_{\mu} \gamma_{\mu} \Delta_{\mu}(x-y) U_{x,\mu} U_{x+\mu,\mu} \dots U_{y-\mu,\mu} + m \delta_{xy}.$$

$x, y$  – узлы  $2d$  решетки пространства-времени с координатами  $x_{\mu}$ ;

$y_{\mu} = -N/2 + 1, -N/2 + 2, \dots, N/2 - 1, N$ ;

$N$  – четное число узлов решетки по одному направлению; направление про-

странства-времени  $\mu = 1, 2$ ; шаг решетки  $a = 1$ ;  $\gamma_1,$

$\gamma_2$  – матрицы Дирака в двумерном пространстве-времени

$$\gamma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix};$$

$U_{x,\mu} = \exp(i A_{x,\mu})$  – внешнее поле с вещественным потенциалом  $A_{x,\mu}$ ;

$\Psi_x$  – волновая функция фермиона.

Граничные условия для  $U_{x,\mu}$  и  $\Psi_x$  имеют вид

$$U_{x \pm N, \mu} = U_{x, \mu}, \quad \Psi_{x \pm N, \nu} = -\Psi_x, \quad \mu, \nu = 1, 2.$$

$\Delta_{\mu}(x)$  – нелокальная дискретная производная фермиона

$$\Delta_{\mu}(x) = \frac{1}{N} \delta_{x_3-\mu, 0} \sum_{p=-N/2+1}^{N/2} \frac{2\pi i}{N} (p-1/2) \exp\left(\frac{2\pi i}{N} (p-1/2)x_{\mu}\right).$$

Интегрирование  $\exp(-S_{VS})$  по всем волновым функциям  $\psi$  приводит к детерминанту фермионной матрицы

$$\int \exp(-S_{VS}) [d\psi d\bar{\psi}] = \det \mathbf{M}[U, 0] = D_{VS}.$$

Этот детерминант является производящей функцией всех фермионных корреляционных функций.

В однородном внешнем поле с потенциалом [6]

$$A_{x,\mu} = \frac{2\pi}{N} h_{\mu},$$

где вещественные числа  $h_{\mu}$  не зависят от  $x$ , данный детерминант имеет вид [1]

$$D_{VS}[h] = \prod_{p_1, p_2 = -N/2+1}^{N/2} \frac{B_1^2(p, h) + B_2^2(p, h)}{B_1^2(p, 0) + B_2^2(p, 0)}.$$

Здесь обозначено

$$B_{\mu}(p, h) = \frac{\pi}{N} \sum_{z=-N/2+1}^{N/2} (-1)^{z+1} \frac{\sin \frac{2\pi}{N} (p_{\mu} - h_{\mu} - 1/2)z}{\sin \frac{\pi z}{N}}.$$

Аналитические исследования и численные расчеты показали [1], что в пределе  $N \rightarrow \infty$

$$\left. \frac{\partial^{2k}}{\partial h_1^{2k}} \ln D_{VS}[h] \right|_{h_1=h_2=0} \sim N.$$

Поэтому  $D_{VS}[h]$  не согласуется с детерминантом непрерывной  $2d$  векторной модели, равным в однородном внешнем поле [6]

$$D_{VC}[h] = |D_{+C}[h]|^2,$$

где обозначено

$$D_{+C}[h] = \exp(i\pi h_2(h_1 + ih_2)) \prod_{n=1}^{\infty} F[n, h] F[n, -h],$$

$$F[n, h] = \frac{1 + \exp(-2\pi(n-1/2) + 2i\pi(h_1 + ih_2))}{1 + \exp(-2\pi(n-1/2))},$$

и векторная модель на  $2d$  решетке требует усовершенствования – введения вспомогательных частиц.

**Векторная модель фермиона на решетке со вспомогательными частицами в однородном внешнем поле**

Действие модели имеет вид [1]

$$S_{VR} = S[\psi, U, 0] + S[\phi_1, U, M] + S[\phi_2, U, M] + S[\phi_3, U, M\sqrt{2}].$$

Здесь  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  – волновые функции трех нефизических частиц: 2 бозонов и одного фермиона соответственно,  $M$  – массовый параметр вспомогательных частиц.

Интегрирование  $\exp(-S_{VR})$  по  $\psi$  и  $\phi_k, k = 1, 2, 3$ , приводит к детерминанту, равному в однородном внешнем поле

$$D_{VR}[h] = D_{VS}[h] \times \prod_{p_1, p_2 = -N/2+1}^{N/2} \frac{G^2[p, 0, M] G[p, h, M\sqrt{2}]}{G^2[p, h, M] G[p, 0, M\sqrt{2}]},$$

где введено обозначение

$$G[p, h, m] = B_1^2(p, h) + B_2^2(p, h) + m^2.$$

Аналитические исследования и численные расчеты показали [1], что детерминант модели на решетке  $D_{VR}[h]$  согласуется с детерминантом непрерывной модели  $D_{VC}[h]$  при массовом параметре  $M$  в интервале  $M_1 \leq M \leq M_2$ , где  $M_1 \sim N^{-0,9}, M_2 \sim N^{-0,5}$  (рис. 1). В этом интервале параметра  $M$  детерминант  $D_{VR}[h]$  согласуется с  $D_{VC}[h]$  при  $|h_\mu| \leq h^*$  (рис. 2), где  $1/2 - h^* \sim (M^4 N)^{1/3}$ . При этом в пределе  $N \rightarrow \infty, h^* \rightarrow 1/2$ .

**Киральная модель фермионов на решетке в однородном внешнем поле**

Действие модели без вспомогательных частиц имеет вид [1, 6]

$$S_{CS} = \sum_{k=1}^4 S[P_+ \psi_{+k}, U, 0] + S[P_- \psi_-, U^2, 0].$$

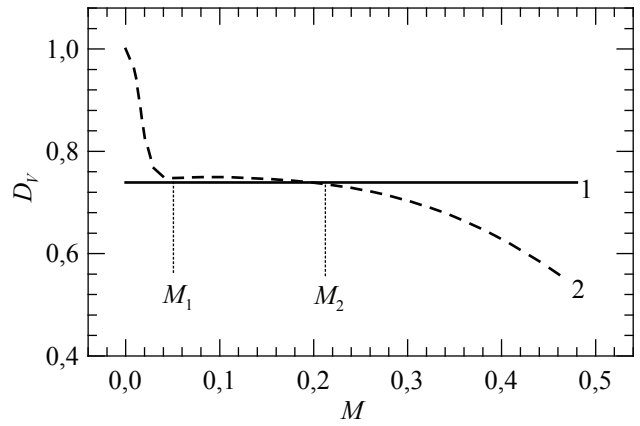


Рис. 1. Детерминанты  $D_V$  векторных моделей в зависимости от массового параметра  $M$  в однородном внешнем поле с  $h_1 = h_2 = 0,2$ : 1 –  $D_{VC}$  непрерывной модели, 2 –  $D_{VR}$  модели на решетке при  $N = 160$

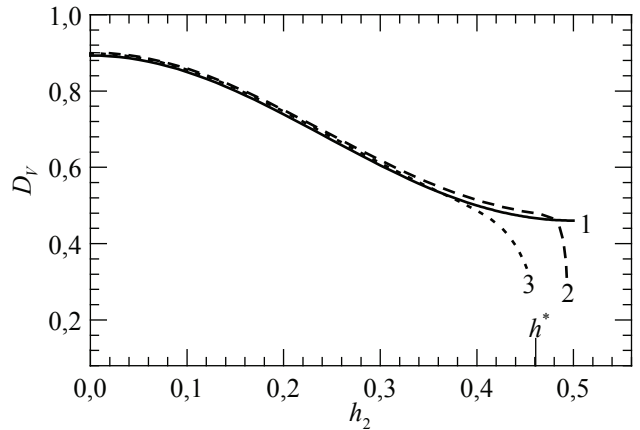


Рис. 2. Детерминанты  $D_V$  векторных моделей в зависимости от  $h_2$  однородного внешнего поля при  $h_1 = 0,2$ : 1 –  $D_{VC}$  непрерывной модели; 2, 3 –  $D_{VR}$  модели на решетке при  $N = 160$ : 2 –  $M = M_1 = 0,04$ ; 3 –  $M = M_2 = 0,2$

Здесь  $P_{\pm} = (1 \pm i\gamma_2 \gamma_1)/2$  – киральные проекторы;  $\psi_{+k}$  – волновая функция положительно-кирального фермиона с безразмерным зарядом 1,  $k = 1, 2, 3, 4$ ;  $\psi_-$  – волновая функция отрицательно-кирального фермиона с безразмерным зарядом 2.

Интегрирование  $\exp(-S_{CS})$  по  $\psi_{+k}, k = 1, 2, 3, 4$ , и  $\psi_-$  приводит к детерминанту модели на решетке  $D_{CS} : D_{CS} = |D_{CS}| \text{Arg } D_{CS}$ . При этом аргумент детерминанта  $\text{Arg } D_{CS}$  не зависит от добавления вспомогательных частиц.

Аналитическими исследованиями и численными расчетами установлено [1], что в однородном внешнем поле аргументы детерминантов модели на решетке и непрерывной теории не согласуются

$$\text{Arg } D_{CS}[h] \neq \text{Arg } D_{CC}[h].$$

Здесь  $D_{CC}[h]$  – детерминант непрерывной киральной теории в однородном поле

$$D_{CC}[h] = D_{+C}^4[h] D_{+C}^* [2h].$$

При этом введение вспомогательных частиц не изменит данного отличия детерминантов.

**Киральная модель фермионов на решетке со вспомогательной частицей в неоднородном внешнем поле**

Действие этой модели на решетке имеет вид [1]

$$S_{CR} = S_{CS} + S[\phi, U^2, M].$$

Здесь  $\phi$  – волновая функция вспомогательной бозонной частицы с массовым параметром  $M$  и безразмерным зарядом 2.

Интегрирование  $\exp(-S_{CR})$  по  $\psi_{+k}$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ ,  $\psi_-$  и  $\phi$  приводит к детерминанту модели

$$D_{CR} = \det^4 \frac{\mathbf{B}[U]}{\mathbf{B}[1]} \det^* \frac{\mathbf{B}[U^2]}{\mathbf{B}[1]} \det \frac{\mathbf{B}^+[1]\mathbf{B}[1] + M^2}{\mathbf{B}^+[U^2]\mathbf{B}[U^2] + M^2}.$$

Здесь  $\mathbf{B}[U]$  – матрица положительно-кирального фермиона

$$\mathbf{B}_{xy}[U] = \Delta_1(x-y) U_{x,1} \dots U_{y-1,1} + i \Delta_2(x-y) U_{x,2} \dots U_{y-2,2},$$

$\mathbf{B}[1]$  – матрица  $\mathbf{B}[U]$  во внешнем поле с  $A_{x,\mu} = 0$ ,  $+$  – операция эрмитова сопряжения.

Потенциал неоднородного внешнего поля имеет вид [6]

$$A_{x,\mu} = \frac{2\pi}{N} h_\mu \cos \frac{2\pi}{N} (k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_\mu / 2),$$

где вещественные величины  $h_\mu$  не зависят от  $x_1$  и  $x_2$ ;  $x_\mu, k_\mu = -N/2 + 1, \dots, N/2$ ;  $\mu = 1, 2$ ;  $k_1^2 + k_2^2 \neq 0$ .

В данном неоднородном внешнем поле детерминант модели  $D_{CR} = D_{CR}[h, k]$ .

Детерминант непрерывной киральной модели в неоднородном внешнем поле имеет вид [6]

$$D_{CC}[h, k] = \exp \left\{ -4\pi \frac{(k_1 h_2 - k_2 h_1)^2}{k_1^2 + k_2^2} \right\},$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – целые числа, причем  $k_1^2 + k_2^2 \neq 0$ .

Аналитические исследования и численные расчеты показали [1], что  $D_{CR}[h, k]$

согласуется с  $D_{CC}[h, k]$  при массовом параметре  $M = M_0(N) \sim N^{-0,28}$ . Значения  $M_0(N)$  находят из соотношения

$$\Pi_{CR}(k) / \Pi_{CC}(k) \Big|_{M=M_0(N)} = \max,$$

где

$$\Pi_C(k) = \left( \frac{\partial^2}{\partial h_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial h_2^2} \right) \ln |D_C[h, k]| \Big|_{h_1=h_2=0},$$

$$\Pi_C(k) = \Pi_{CR}(k), \Pi_{CC}(k) \text{ при } D_C[h, k] = D_{CR}[h, k], D_{CC}[h, k].$$

**Заключение**

В данной работе приведены результаты аналитических и численных исследований векторной и киральной нелокальных моделей фермионов со вспомогательными частицами на двумерной конечной решетке.

Показано, что векторная нелокальная модель фермионов на решетке с тремя вспомогательными частицами согласуется с непрерывной теорией во внешнем однородном поле. Киральная нелокальная модель фермионов на решетке со вспомогательными частицами не согласуется с непрерывной теорией во внешнем однородном поле. Но во внешнем неоднородном поле данная модель на решетке с одной вспомогательной частицей согласуется с непрерывной теорией.

Полученные результаты целесообразно использовать при исследованиях моделей фермионов методом решетки.

**Библиографический список**

1. Зверев, Н.В. Регуляризованные U(1) модели фермионов на решетке / Н.В. Зверев. – М.: Прометей, МПГУ. – 2004. – 126 с.
2. Wilson K.G. Confinement of quarks // Phys. Rev. D. 1974. V. 10. P. 2445–2459.
3. Drell S., Weinstein M., Yankielowicz S. Strong-coupling field theory: Fermions and gauge fields on a lattice // Phys. Rev. D. 1976. V. 14. P. 1627–1647.
4. Karsten L., Smit J. The vacuum polarization with SLAC lattice fermions // Phys. Lett. B. 1979. V. 85. P. 100–102.
5. Slavnov A.A. A proposal for chiral fermions on the lattice // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 1995. V. 42. P. 166–170.
6. Narayanan R., Neuberger H. Anomaly free U(1) chiral gauge theories on a two dimensional torus // Nucl. Phys. B. 1996. V. 477. P. 521–548.



## К ВОПРОСУ О ВКЛЮЧЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИСТОРИИ МАТЕМАТИКИ В КАЧЕСТВЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ СОСТАВНОЙ ЧАСТИ В МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЛЕКЦИОННЫЕ КУРСЫ

К.К. РЫБНИКОВ, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук,*  
Т.А. ЛАСКОВАЯ, *ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*kkrybnikov@mail.ru; talaskovy@mail.ru*

Освещение страниц истории, связанных с деятельностью известных математиков, при чтении математических дисциплин в высших учебных заведениях является традиционным методическим приемом, широко используемым лекторами. Наибольший интерес при этом у студентов вызывают сведения о научной и педагогической деятельности ученых-математиков, работавших в свое время в их учебных заведениях.

Опыт авторов относится к анализу истории Московского лесотехнического института (ныне Московского государственного университета леса). Начиная с основания института (в период с 1919 г. по 1926 г.) здесь работали Н.Н. Лузин, О.Ю. Шмидт, С.А. Чаплыгин, А.Ф. Иоффе, Д.Е. Меньшов, Н.К. Бари; в последующем (1943 г. – 1960 г.) – Н.В. Ефимов, Б.А. Фукс, Д.В. Клетеник; с 1963 г. по 1968 г. – А.В. Ефимов. Среди работ этих математиков встречаются результаты (часто малоизвестные), представляющие несомненный интерес для студентов технических университетов с учетом их профессиональной специализации.

Так, для студентов факультета экономики и внешних связей МГУ леса может быть включена в программу простая математическая модель денежной эмиссии, предложенная в сентябре 1922 г. О.Ю. Шмидтом во время его выступления перед слушателями Социалистической академии. Его нашумевший доклад, в котором он также призвал экономистов активно использовать математический аппарат в их исследованиях, вызвал ожесточенную дискуссию как научного, так и политического характера [1].

Несомненный интерес вызывает у студентов факультета электроники и системотехники одна из страниц творчества Н.Н. Лузина. В 1931 г. С.А. Чаплыгин пригласил его на работу в ЦАГИ, где Н.Н. Лузин единствен-

ный раз за свою творческую карьеру изменил своему основному увлечению – теории функций и подготовил две работы прикладного характера, посвященные анализу метода приближенного интегрирования С.А. Чаплыгина и исследованию уравнения движения поезда [3, 4].

В докладе была предложена простая математическая модель анализа денежной эмиссии. В основу ее автор положил уравнение [6]

$$ksqdt = dq, \quad (1)$$

где  $q$  – объем наличных денег в обращении,  $u$  – стоимость в денежном выражении совокупности товаров на рынке, причем связь между ними предполагается линейной;  $u = kq$ , а  $s$  – доля имеющихся на рынке товаров, которую в единицу времени приобретает государство путем эмиссии. Таким образом, в течение бесконечно малого промежутка времени  $dt$  приобретает часть  $sdt$  всех товаров, стоимость которой равна  $usdt$ . На приобретение этих товаров уходят деньги, выпущенные за это время, то есть приращение денежной массы  $dq$  за промежуток времени  $dt$ . Решением уравнения (1) является

$$q = q_0 e^{kst}, \quad (2)$$

где  $q_0$  – наличие денег в момент  $t = 0$ .

В качестве прямого следствия соотношения (2) О.Ю. Шмидт указал, что если в единицу времени возвращается в виде доходов государства часть  $r$  от наличности, то формула количества выпускаемых денег будет иметь вид  $q = q_0 e^{(ks-r)t}$  и с ростом  $r$  эмиссия уменьшается.

Анализ эмпирических данных с точки зрения соответствия их построенной модели, по мнению ее автора, показывал практическую адекватность модели реальным эмиссионным процессам. В то же время ряд экономистов (прежде всего Е.А. Преображенский) подвергли модель резкой критике. Однако дру-

гие специалисты (В.А. Базаров, Е.Е. Слуцкий) отметили теоретическую ценность модели О.Ю. Шмидта и даже подтвердили его вывод о постоянстве темпа эмиссии [6].

В любом случае следует заметить, что модель О.Ю. Шмидта оказалась первой математической моделью в теории денежной эмиссии.

Для студентов механических инженерных специальностей (лесной и факультет механической и химической технологии обработки древесины) интересной иллюстрацией в области математических приложений является абсолютно неизвестная для математиков работа выдающегося советского геометра Н.В. Ефимова «Исследование одной линии» [2], в которой он решает задачу теоретического обоснования принципов работы одного из механизмов, используемого в деревообрабатывающей отрасли.

Вряд ли биографам Н.В. Ефимова хорошо известен тот факт, что помимо теоретических исследований в геометрии Николай Владимирович занимался и практическими исследованиями в интересах лесотехнического промышленного комплекса.

Заведующий кафедрой теории машин и механизмов лесного комплекса профессор (впоследствии академик) В.Г. Нестеров сформулировал задачу теоретического обоснования работы одного из механизмов, являющихся изобретением коллектива, работавшего под его руководством. Задача представлялась весьма сложной. Однако она была успешно решена Николаем Владимировичем. Свои результаты он привел в работе «Исследование одной линии», включенной в научно-технический отчет МАТИ за 1950 г. [14].

Задача состояла в следующем. В плоскости движется круг неизменного радиуса так, что центр его находится на постоянной прямой  $AB$ . Рассматривается некоторая линия  $L$ , которая, сохраняя свою форму, перемещается поступательно в направлении, перпендикулярном прямой  $AB$ , и все время касается круга в некоторой (переменной) точке  $M$ . Требуется найти и исследовать линию  $L$  при условии, что касательная к ней в точке  $M$  неизменно проходит через фиксированную точку  $C$  на прямой  $AB$ . В работе сделан вывод:

кривая, касаясь круга, охватывает его сверху и, кроме точки прикосновения, других точек с этим кругом не имеет. Статья осталась неопубликованной (по всей видимости, Николай Владимирович и не собирался ее публиковать). Работы по данной теме в дальнейшем были прекращены.

Руководимая Н.В. Ефимовым кафедра высшей математики МЛТИ представляла собой весьма сильный в профессиональном отношении коллектив преподавателей. Создание такого коллектива – несомненная его заслуга. На кафедре тогда работали Б.А. Фукс, Р.Я. Берри, Д.В. Клетеник, Р.З. Хасьминский и др. Именно в этот период были написаны упоминавшиеся нами ранее учебные пособия самого Н.В. Ефимова – «Высшая геометрия» (1945) и «Краткий курс аналитической геометрии» (1949), а также широко известный «Сборник задач по аналитической геометрии» Д.В. Клетеника, выдержавший много изданий. В это же время появляются в печати известные монографии Б.А. Фукса, посвященные теории аналитических функций.

Несомненный интерес для исследователя представляют собой научные отчеты кафедры 50-х годов, выполненные под руководством Н.В. Ефимова. В этих отчетах помимо фундаментальных теоретических исследований появлялись результаты чисто прикладного характера. К этим результатам следует отнести «Об определении оптимальных разделов лесосек» большой раздел отчетов 1953–1955 гг. «Разработка вариантов критериев технической устойчивости механических систем». Последние работы получили высокую оценку таких, например, видных математиков как член-корреспондент (впоследствии академик) АН СССР, лауреат Государственной и Нобелевской премии Л.В. Канторович.

Использование подобных историко-математических иллюстраций представляется целесообразным при чтении лекционных математических курсов для студентов и аспирантов.

### Библиографический список

1. Белых, А.А. История российских экономико-математических исследований. Первые сто лет / А.А. Белых. – М.: ЛКИ, 2007. – 240 с.

2. Ефимов, Н.В. Исследование одной линии / Н.В. Ефимов // Научно-технический отчет. МЛТИ. – 1950. – МОГА. – Фонд 7188. ОП. – Т. 1. – Дело 212.
3. Лузин, Н.Н. О методе приближенного интегрирования академика С.А. Чаплыгина / Н.Н. Лузин // Труды ЦАГИ. – 1932. – Т. 141. – С. 1–32.
4. Лузин, Н.Н. О качественном исследовании уравнения движения поезда / Н.Н. Лузин // Математический сборник. – 1932. – Т. 39:3. – С. 6–26.
5. Отзыв Л.В. Канторовича на работу Р.Я. Берри «Исследование конуса положительных элементов в полуупорядоченном пространстве // МОГА. – фонд 7188. – Т. 1. – дело 40.

## ОТКРЫТИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ЧИСЕЛ, ИХ ЗНАЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Д. МАРКОВСКИЙ, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ-мат. наук*

*caf-math@mgul.ac.ru*

Начиная с 1975 г. на ФЭСТе разрабатывались два направления: «Машинные арифметики» и «Цифровые кодирования чисел», связанные с приближенными и точными представлениями чисел.

К 1980 г. была создана аксиоматическая теория машинных арифметик, проведена их классификация по различным критериям с выявлением оптимальных и превосходящих по определенным качествам известные; получены основополагающие результаты по анализу ошибок округления, найдены все классы «безошибочных арифметик» для всех арифметических операций [1].

Предметом *открытия* является «поразительное» соответствие между аксиомами структуры машинных арифметик и аксиомами топологии; поразительное хотя бы потому, что по содержанию сравниваемые структуры кажутся чуть ли не противоположными: машинные арифметики – «вместилище для вычислений на дискретных множествах машинных чисел», а топология – «фундамент непрерывности для всей математики». Найденное соответствие послужило основой для новой математической теории «мерильных структур», синтезирующей структуры топологии и машинных арифметик. Новая теория докладывалась на ФЭСТе на научно-технической конференции МГУЛ за 2007 г.

При разработке теории цифровых кодирований были введены «вычислительные базисы» для различных числовых систем и, более общо, для групп, колец, линейных алгебр. Изучение различных схем преобразований цифровых кодов от «аддитивных»

вычислительных базисов к «мультипликативным» и обратно привело к *открытию* нового «мультипликативного метода цифровых вычислений», обобщающего, систематизирующего и ускоряющего основные вычислительные процедуры, включая методы «цифра за цифрой» [2, 3].

Открытие мультипликативного метода цифровых вычислений обусловлено тем неожиданным обстоятельством, что основные вычислительные процедуры, вплоть до реализации преобразований групп вращений и Лоренца и некоторых неизвестных ранее, но крайне полезных процедур, наподобие «быстрого сложения чисел на логарифмической линейке», могут быть получены простым распараллеливанием упомянутых схем базисных преобразований и конкретизацией некоторых входящих в них параметров. Например, «школьный» метод определения частного  $y/x$  в десятичной системе счисления и «двоичные» алгоритмы деления с восстановлением и без восстановления остатка, используемых в современных устройствах, являются частными случаями мультипликативного метода разложения дуальных чисел  $x + yi, i^2 = 0$ , по определенному дуальному мультипликативному базису. Знание этого факта позволяет универсально описать, распараллелить и ускорить классические алгоритмы деления, по существу создав новые сверхбыстрые алгоритмы деления вектора на скаляр.

На ФЭСТе на основе мультипликативного метода вычислений было выполнено и внедрено значительное число научно-технических работ по заказам целого ряда

предприятий; в течение многих лет читался спецкурс «Мультипликативные алгоритмы и машинные арифметики», получивший высокую оценку в работе [4].

Впереди повсеместное утверждение мультипликативного метода вычислений, его глубокое проникновение в школьную и вузовские программы по математике, а в ближайшей перспективе намечается его плодотворный синтез с недавно обнаруженными методами «непрерывного кодирования чисел»

*Кодирование* чисел из некоторого множества  $D \subset R$  – это инъективное отображение  $M: D \rightarrow K$ , где  $K$  определенное пространство цифровых кодов. *Стандартные кодирования* реализуются представлениями чисел из  $D$  в  $a$ -ичных системах счисления. Любое стандартное кодирование, определенное на множестве рациональных чисел  $Q$ , и тем более на  $R$ , имеет бесконечное число точек разрыва в любой окрестности любого числа. При сложении чисел, заданных стандартными кодами, возможен сколь угодно длинный перенос от младших разрядов к старшим. Булева функция, выражающая значение  $n$ -го разряда суммы двух «стандартных двоичных чисел», является «глобально детерминированной», поскольку зависит от значений *всех*  $n$  младших разрядов каждого слагаемого. Глобальный детерминизм делает принципиально невозможным эффективное сложение стандартных двоичных чисел, имеющих бесконечное число цифр после запятой.

На пленарных докладах научно-технических конференций МГУЛ в 1985–1986 гг. и на Седьмой международной петрозаводской конференции [5] сообщалось об открытии неизвестных ранее непрерывных кодирований чисел, ограничивающих перенос при сложении. Ограничение переноса при сложении двух чисел, представленных новыми двоичными кодами, называемыми в дальнейшем  $M$ -кодами, означает, что булева функция каждого  $K$ -го разряда суммы двух «двоичных  $M$ -чисел» зависит не более чем от  $p$  старших и  $q$  младших разрядов слагаемых, где  $p$  и  $q$  – фиксированные числа, не зависящие от  $K$ . Тем самым, вопреки существовавшему мнению, глобальная детерминированность булевой функции сложения двоичных чисел и

возможность неограниченного переноса вовсе не характеризуют «природу сложения», а являются следствиями неэффективности используемых на сегодняшний день кодирований чисел. Открытие  $M$ -кодов влечет за собой принципиальную возможность существования параллельных алгоритмов сложения рекурсивных действительных чисел.

Для точных определений, связанных с непрерывными кодированиями чисел, потребовалось наделять пространства бесконечных цифровых кодов неархимедовыми метриками [6]. В отличие от известных неархимедовых метрик для поля  $p$ -адических чисел, востребованные метрики не индуцируются какими-либо нормами.

Непрерывные кодирования позволяют «бесплатно» во много раз повысить быстродействие вычислений, открывают новые возможности хранения, обработки, передачи и защиты информации. Квалифицированное патентование структуры и различных способов непрерывных кодирований, их оперативная реализация в новых устройствах на основе нанотехнологий и мультипликативного метода вычислений поставили бы соответствующую отечественную цифровую технику существенно выше зарубежных аналогов.

### Библиографический список

1. Марковский, А.Д. Автореферат диссертации / А.Д. Марковский. – М.: ВЦАН СССР, 1980.
2. Марковский, А.Д. Мультипликативные алгоритмы типовых вычислений и организация устройств на их основе / А.Д. Марковский, Г.Г. Меликов // Научн. тр. Моск. лесотехн. ин-та, 1989. – Вып. 217.
3. Марковский, А.Д. Параллельные алгоритмы деления на основе мультипликативных разложений действительных чисел / А.Д. Марковский и др. – М.: ИКИ АН СССР, 1990.
4. Санаев, В.Г. Профессиональные кадры для ракетно-космической отрасли России / В.Г. Санаев, О.Н. Новоселов // Аэрокосмический курьер. – 2004. – Вып. 2.
5. Марковский, А.Д. Непрерывные кодирования чисел, ограничивающие перенос при сложении / А.Д. Марковский // Обозр. прикл. и промышл. матем. – 2008. – Т. 15. – Вып. 3.
6. Марковский, А.Д. Неархимедовы метрики и псевдометрики в пространствах бесконечных цифровых кодов / А.Д. Марковский // Обозр. прикл. и промышл. матем. – 2009. – Т. 16 – Вып. 1.



## О СМЕШАННОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА КВАЗИПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

И.Е. СИГАЛОВ, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, д-р. физ-мат. наук,*  
Л.А. УРОШЛЕВ, *лаб. каф. высшей математики МГУЛ*

*leonidyroshlev@list.ru*

Рассматривается задача о нахождении решений  $u(t,x)$  квазипараболического уравнения вида

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = b^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \quad (1)$$

в области  $Q = \{0 < t \leq T, x > 0\}$ ,  $b \in R/0$ , удовлетворяющего условиям

$$u|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

$$u(t,x) = f(t) \quad (3)$$

$x \rightarrow +0$

Поставленная задача решается с помощью преобразования Лапласа по  $t$

$$u(t,x) = \int_{a_0-i\infty}^{a_0+i\infty} e^{pt} v(x,p) dp. \quad (4)$$

Для того, чтобы  $u(t,x)$  удовлетворяла условиям (1, 2, 3), она должна быть решением краевой задачи

$$p \frac{dv}{dx} + b^2 \frac{d^3 v}{dx^3} = 0, \quad (5)$$

$$v|_{x=0} = \tilde{f}(p), \quad (6)$$

$$\tilde{f}(p) = \int_{i_0}^{\infty} e^{-p\tau} f(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Получено полупространственное фундаментальное решение

$$G(t,x) = \int_{a_0-i\infty}^{a_0+i\infty} e^{pt - \frac{x\sqrt{p}}{|b|}} dp.$$

Доказана разрешимость задачи (1-2-3) и получена формула решения

$$u(t,x) = \int_0^{\infty} G(t-\tau,x) d\tau, f(t) \in C^1[0; \infty).$$

Для простоты возьмем уравнение, получаемое при  $b = i$

$$\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}. \quad (8)$$

Решим численно следующую смешанную задачу

$$u(0,t) = \varphi(0,t), u(x,0) = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{x=x_0} = 0$$

решается в прямоугольнике

$$[0,0;x_0,t_0]. \quad (9)$$

Заменим в (8) частные производные следующими разностными отношениями [1].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \Rightarrow \frac{u(x+3\Delta x,t) - 3u(x+2\Delta x,t) + 3u(x+\Delta x,t) - u(x,t)}{(\Delta x)^3} \\ & \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \Rightarrow \frac{u(x+\Delta x,t+\Delta t) - u(x,t+\Delta t) - u(x+\Delta x,t) + u(x,t)}{\Delta x \Delta t}, \end{aligned}$$

откуда получаем следующий разностный оператор

$$L_{hl}(u) = \frac{u_n^{m+3} - 3u_n^{m+2} + 3u_n^{m+1} - u_n^m}{h^3} + \frac{u_{n+1}^{m+1} - u_n^m - u_n^{m+1} + u_n^m}{lh}, \quad (10)$$

где  $u_n^m$  – значение функции в точке  $(m,n)$ ;  $u_n^{m+1}$  и  $u_{n+1}^m$  – значения в точках  $(m+h,n)$  и  $(m,n+l)$ .

Далее спроецируем граничные условия на равномерную сетку с длиной ячейки  $h$  и шириной ячейки  $l$ . Получим

$$u_n^0 = \varphi(n), u_0^m = 0, \frac{u_t^{x_0-1} - u_t^{x_0}}{h} = \frac{u_t^{x_0-2} - 2u_t^{x_0-1} + u_t^{x_0}}{h^2},$$

для любого  $t \in [0, t_0]$ . (11)

Преобразуем (10)

$$\begin{aligned} & \frac{u_n^{m+3} - 3u_n^{m+2} + 3u_n^{m+1} - u_n^m}{h^3} + \frac{u_{n+1}^{m+1} - u_n^m - u_n^{m+1} + u_n^m}{lh} = 0 \Rightarrow \\ & u_{n+1}^{m+1} = -\frac{l}{h^2} (u_n^{m+3} - 3u_n^{m+2} + 3u_n^{m+1} - u_n^m) + u_{n+1}^m + u_n^{m+1} - u_n^m. \end{aligned}$$

Таким образом, значение решения уравнение в любой точке линейно выражается через значения решения в предыдущих точках, в которых значения решения уже вычислены.

**Программа на языке Pascal для вычисления значения функции  
в любой точке в условиях данной смешанной задачи**

```

program Diff_Ur;
uses CRT;
function Caushi_Function (x: real): real;
begin
  Caushi_Function:=1/(1+sqr(x));
end;
function Yr_Usl (x: real): real;
begin
  Yr_Usl:=0;
end;
var u3,u2,u1,u,um1,ns: real;
    h,l: real;
    x,t,e,r: real;
    buf, buf2: file of real;
begin
  clrscr;
  writeln ('Введите точку');
  read (x);
  read (t);
  writeln ('Введите длину и ширину ячейки сетки');
  read (h);
  read (l);
  assign (buf, 'tmp.$$$');
  rewrite (buf);
  assign (buf2, 'tmp2.$$$');
  rewrite (buf2);
  e:=3*l;
  um1:=Caushi_Function (0);
  u:=Caushi_Function (0);
  u1:=Caushi_Function (l);
  u2:=Caushi_Function (2*l);
  u3:=Caushi_Function (3*l);
  while (e<=x) do
  begin
    ns:=(-h/sqr(l))*(u3-3*u2+3*u1-u) + um1+u1-u;
    um1:=ns;
    write (buf,ns);
    u:=u1;
    u1:=u2;
    u2:=u3;
    e:=e+h;
    u3:=Caushi_Function (e);
  end;
  e:=0;
  r:=0;
  close (buf);
  assign (buf,'tmp.$$$');
  reset (buf);
  while (r<t) do
  begin
    um1:=Yr_Usl (e);
    read (buf, u);
    read (buf, u1);
    read (buf, u2);
    read (buf, u3);
  end;
end;

```

```

e:=e+1;
while not eof(buf) do
begin
ns:=(-h/sqr(1))*(u3-3*u2+3*u1-u)+um1+u1-u;
um1:=ns;
u:=u1;
u1:=u2;
u2:=u3;
read (buf, u3);
write (buf2, ns);
end;
ns:=(-h/sqr(1))*(u3-3*u2+3*u1-u)+um1+u1-u;
write (buf2, ns);

write (buf2, ns);           {Так как из условий (3) имеем  $u_t^{x_0-2} = u_t^{x_0-1} = u_t^{x_0}$ , }
write (buf2, ns);         { то последовательно запишем в файл три раза последнее }
write (buf2, ns);         { значение схемы }
erase (buf);
close (buf);
rename (buf2,'tmp.$$$');
assign (buf, 'tmp.$$$');
reset (buf);
close (buf2);
assign (buf2, 'tmp2.$$$');
rewrite (buf2);
r:=r+1;
end;
writeln ('z(x,t)=' ,ns);   {Вывод результата на экран}
end.

```

Найдем порядок аппроксимации данной схемы. Обозначим  $r_n(u)$  абсолютную погрешность схемы (10).

$$r_n(u) = \frac{u_n^{m+3} - 3u_n^{m+2} + 3u_n^{m+1} - u_n^m}{h^3} + \frac{u_{n+1}^{m+1} - u_{n+1}^m - u_n^{m+1} + u_n^m}{lh} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}. \quad (12)$$

Из формулы Тейлора имеем

$$u(x+3h,t) = u(x,t) + \frac{\partial u}{\partial x} 3h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (3h)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} (3h)^3 + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} (3h)^4,$$

$$u(x+2h,t) = u(x,t) + \frac{\partial u}{\partial x} 2h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (2h)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} (2h)^3 + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} (2h)^4,$$

$$u(x+h,t) = u(x,t) + \frac{\partial u}{\partial x} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} h^2 +$$

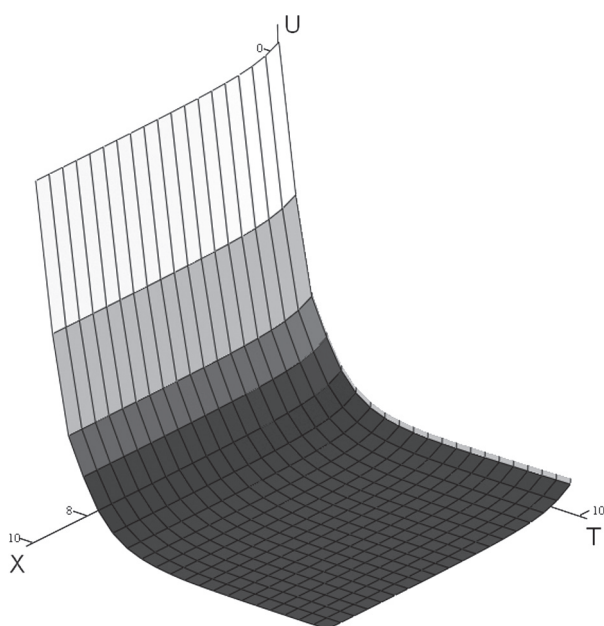
$$+ \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} h^3 + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} h^4,$$

Подставляя в (12) и складывая, получаем

$$\begin{aligned} & u(x,t) + 3 \frac{\partial u}{\partial x} h + \frac{9}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} h^2 + \frac{27}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} h^3 + \frac{81}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} h^4 \\ & - \frac{3u(x,t) + 6 \frac{\partial u}{\partial x} h + 6 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} h^2 + 4 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} h^3 + \frac{48}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} h^4}{h^3} \\ & + \frac{3u(x,t) + 3 \frac{\partial u}{\partial x} h + \frac{3}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} h^2 + \frac{3}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} h^3 + \frac{3}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} h^4}{h^3} \\ & - \frac{u(x,t)}{h^3} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = \frac{36}{24} \frac{\partial^4 u(\xi,t)}{\partial x^4} h. \end{aligned} \quad (13)$$

Далее оценим погрешность аппроксимации смешанной производной. Для первой производной из формулы Тейлора имеем

$$u(x+h,t) - u(x,t) = \frac{\partial u}{\partial x} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial x^2} h^2.$$



Рисунок

Далее, применяя для разности, ту же формулу по  $t$ , получим

$$u(x+h, t+l) - u(x, t+l) - u(x+h, t) + u(x, t) = \left( \frac{\partial u(x+h, t+l)}{\partial x} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u(\xi, t+l)}{\partial x^2} h^2 - \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} h - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u(\xi, t)}{\partial x^2} h^2 \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} hl + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 u(\xi, t)}{\partial x^2 \partial t} h^2 l +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u(x, \vartheta)}{\partial x \partial t} hl^2 + \frac{1}{4} \frac{\partial^3 u(\xi, \vartheta)}{\partial x^2 \partial t} h^2 l^2.$$

Отсюда, погрешность вычисления смешанной производной равна

$$\frac{u(x+h, t+l) - u(x, t+l) - u(x+h, t) + u(x, t)}{hl}$$

$$= \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^3 u(\xi, t)}{\partial x^2 \partial t} h + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u(x, \vartheta)}{\partial x \partial t} l + \frac{1}{4} \frac{\partial^3 u(\xi, \vartheta)}{\partial x^2 \partial t} hl. \quad (14)$$

Окончательно, из (13) и (14) имеем

$$r_n(u) = O(2h + l). \quad (15)$$

При начальном условии  $u(t, 0) = 1/(1+t^2)$  численный расчет дает функцию, изображенную на рисунке.

Таким образом, возможно находить как точное решение квазипараболического уравнения, так и приближенное, посредством программы.

#### Библиографический список

1. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003.
2. Самарский, А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1971. – 553 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА «ПРИВЛЕЧЕНИЕ КЛИЕНТА»

Р.В. СУСОВ, преподаватель каф. вычислительной техники МГУЛ

[susovroman@mail.ru](mailto:susovroman@mail.ru)

Одним из наиболее передовых методов управления организацией, позволяющим достичь наибольшей эффективности, является так называемый процессный подход к управлению, заключающийся в выделении в организации цепочек бизнес-процессов и управления этими процессами для достижения максимальной эффективности деятельности [1]. Процессный подход позволяет менеджменту комплексно взглянуть на проблемы управления организацией и подсказать способы решения этих проблем [2]. Для имитации поведения компании во времени и анализа реализации бизнес-процессов с точки зрения

достаточности ресурсов и эффективности их использования разрабатываются имитационные модели. Методы имитационного моделирования позволяют генерировать конкретные бизнес-случаи выполнения бизнес-процессов на заданном интервале времени и проводить анализ показателей, полученных по результатам моделирования. Анализ результатов имитационного моделирования позволяет определить узкие места в реализации бизнес-процессов, выявить наиболее трудоемкие функции, затратные центры и организационные единицы с низким коэффициентом использования, провести функционально-



стоимостной анализ и выработать рекомендации по оптимизации и совершенствованию дефектных процессов [3].

Структура показателей оценки эффективности бизнес-процессов включает следующие целевые показатели:

- совокупная стоимость затрат на персонал при выполнении функций;
- совокупная стоимость прочих затрат при выполнении функций;
- совокупная стоимость общих затрат на выполнение функций;
- количество выполненных функций;
- совокупное время выполнения функций;
- общая продолжительность работы сотрудников;
- количество функций, выполняемых сотрудниками;
- коэффициенты использования организационных единиц.

Эти показатели, полученные после имитационного моделирования, позволяют понять степень эффективности бизнес-процесса. Не менее важны другие показатели, которые не поддаются количественной оценке, например узкие места бизнес-процесса, избытки согласований, выполнение сотрудниками бесполезной работы и многие другие. Если количественные показатели эффективности могут быть получены в результате простого прогона модели, то качественные показатели – только после тщательного и всестороннего исследования модели аналитиком.

В данной статье рассмотрена оптимизация бизнес-процесса «Привлечение клиента» как одного из наиболее сложных в управлении бизнес-процессов в небольшой торговой компании как с точки зрения количества, стоимости и времени выполнения функций, так и с точки зрения количества задействованных человек.

Для моделирования можно использовать различные инструментальные средства и методологии. В данной статье применялась методология АРИС, реализованная в наборе программ ARIS Toolset. Построение моделей, их отладка и прогон осуществлялись с помощью комплекта программ ARIS Toolset 6.2 [4, 5].

## Описание бизнес-процесса «Привлечение клиента»

Рассмотрим карту маршрута бизнес-процесса «Привлечение клиента» (рисунок). Новые клиенты у компании появляются одним из двух способов: обращаются самостоятельно или находятся торговыми представителями. После того как проведена презентация и подготовлено «Коммерческое предложение» клиент отказывается, соглашается или требует высокую скидку. Согласование нестандартных скидок находится под контролем у начальника отдела продаж.

Основные обслуживающие блоки любой модели бизнес-процесса – функции, события и должности. Функция – это задача, операция или действие, выполняемое над объектом для достижения одной или нескольких целей. Должность – это тип организационной единицы, выполняющий функции. Бизнес-процесс представляет собой цепочку функций, последовательно выполняемых сотрудниками, занимающими различные должности. В результате выполнения каждой функции генерируется одно или несколько событий в соответствии с приоритетом их наступления и логическими операторами, которые их соединяют. Старт бизнес-процесса может осуществляться одним из стартовых событий с заранее заданной периодичностью.

Одна из характеристик каждого объекта типа «событие», не являющегося стартовым, это приоритет наступления этого события. Таким образом, моменты наступления всех событий, кроме стартовых, подчинятся карте маршрута бизнес-процесса и приоритету наступления событий в точках разветвления. Приоритет наступления всех их одинаков.

Единственная характеристика объекта типа «должность» – количество сотрудников, занимающих эту должность. Всего в бизнес-процессе задействовано 11 сотрудников, занимающих 5 должностей. Сотрудники распределяются по должностям следующим образом:

- секретарь – 1;
- менеджер по продажам – 6;
- торговый представитель – 2;
- телемаркетолог – 1;
- начальник отдела продаж – 1.

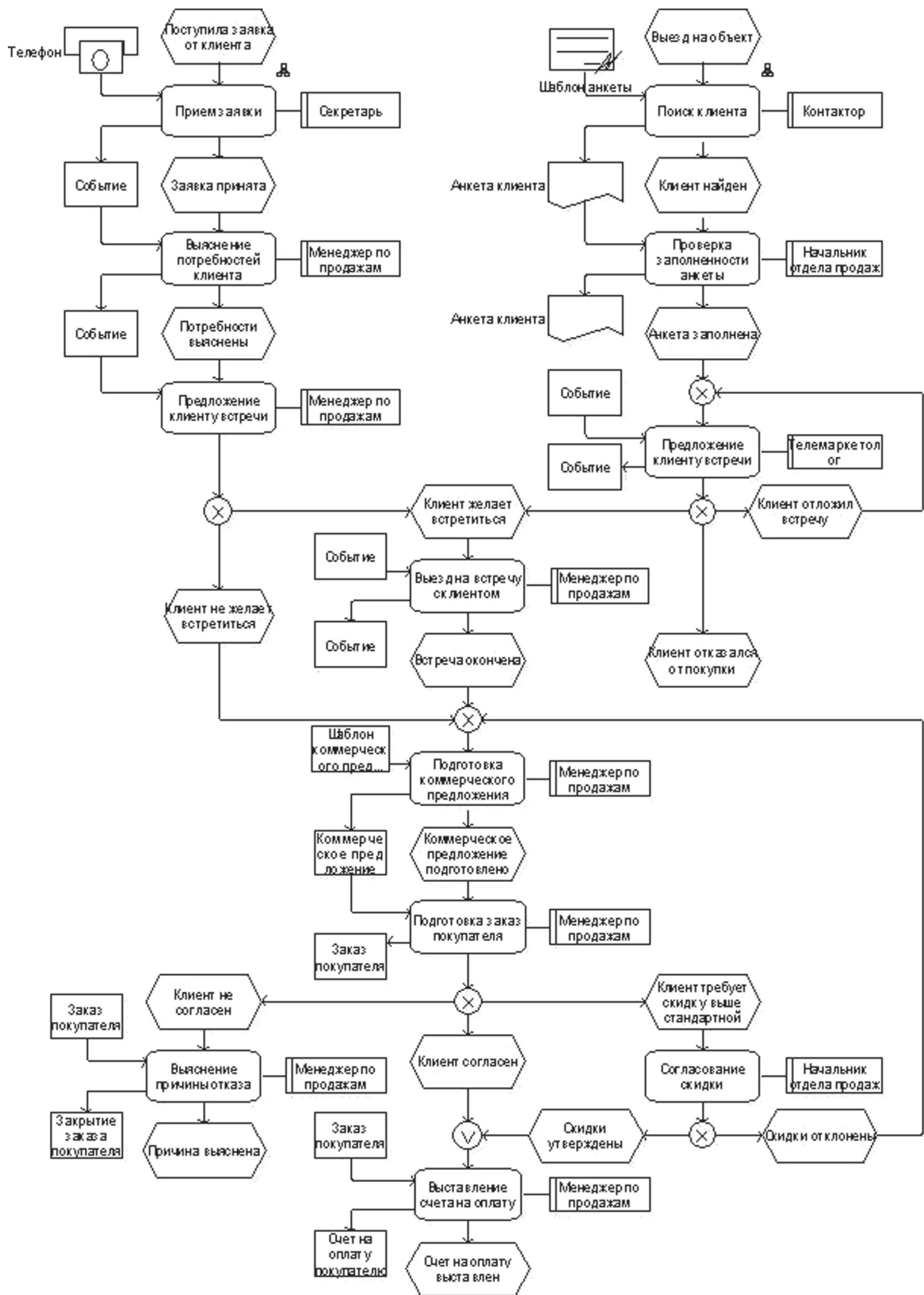


Рисунок. Карта маршрута бизнес-процесса «Привлечение клиента»

**Характеристики обслуживающих блоков типа «Функция»**

Функция	Мин. время выполнения, ч:м:с	Макс. время выполнения, ч:м:с	Затраты на выполнение персоналом, EUR	Прочие затраты, EUR
Прием заявки	00:07:00	00:13:00	1,50	2,00
Выяснение потребностей клиента	00:10:00	00:25:00	4,00	1,00
Предложение клиенту встречи	00:20:00	00:30:00	2,00	2,00
Поиск клиента	02:30:00	05:30:00	3,00	9,00
Проверка заполненности анкеты	00:30:00	01:30:00	6,00	0,00
Выезд на встречу с клиентом	01:00:00	01:30:00	6,00	6,00
Подготовка коммерческого предложения	00:50:00	01:40:00	4,00	3,00
Подготовка заказа покупателя	00:20:00	00:30:00	3,00	1,00
Выяснение причины отказа	00:05:00	00:10:00	1,00	0,50
Согласование скидки	00:20:00	00:30:00	5,00	1,50
Выставление счета на оплату	00:10:00	00:20:00	2,00	3,00

**Отличия в характеристиках моделей инициации процесса «привлечение клиента» – «поступила заявка от клиента» и «выезд на объект»**

Модель	Поступила заявка от клиента	Выезд на объект
Начало рабочего дня, ч:м	09:00	09:00
Продолжительность рабочего дня, ч	9	9
Количество рабочих дней в неделю	5	5
Периодичность, дни	7	7
Среднее количество процессов в день	14	10

Для каждой конкретной функции была получена оценка минимального и максимального времени ее выполнения и стоимость, складывающаяся из стоимости оплаты времени работы сотрудника, выполняющего данную функцию, а также затраты на звонки по телефону, пользование сетью «Интернет», стоимость бензина, проезда на метро и прочее. Перечень стоимости выполнения каждой функции приведен в табл. 2.

Выполнение каждого бизнес-процесса иницируется одним или несколькими стартовыми событиями. Таким образом, входные потоки для каждого бизнес-процесса – события, периодичность наступления которых определяется некоторым законом распределения. Для генерации событий с определенной периодичностью каждое из стартовых событий имеет вложенную модель типа «модель инициации процесса», определяющую порядок и цикличность генерации событий.

В модели «привлечение клиента» стартовыми являются два события: «поступила заявка от клиента» и «выезд на объект».

Оба этих события имеют один и тот же алгоритм инициации процесса, отличающийся несколькими характеристиками. Отличия в характеристиках моделей инициации процесса «привлечение клиента» – «поступила заявка от клиента» и «выезд на объект» приведены в табл. 3.

Таким образом, в бизнес-процессе «привлечение клиента» в рабочие часы каждого дня создается определенное количество экземпляров бизнес-процессов. Этот процесс повторяется количество раз, соответствующих количеству рабочих дней в неделе.

**Результаты имитационного моделирования бизнес-процесса «привлечение клиента»**

Прогон модели подразумевает установку интервала моделирования (в данном случае интервал соответствует неделе) и настройку состава анализируемых параметров.

**Статистика времени, количества и стоимости функций  
в бизнес-процессе «Привлечение клиента»**

Функция	Количество обработанных функций	Время обработки, д:ч:м:с	Затраты на персонал, EUR	Прочие затраты, EUR	Всего затрат, EUR
Прием заявки	70	0000:11:55:58	105,00	140,00	245,00
Выяснение потребностей клиента	70	0000:21:18:38	280,00	70,00	350,00
Предложение клиенту встречи	179	0003:02:58:31	358,00	358,00	716,00
Поиск клиента	50	0008:03:29:45	150,00	450,00	600,00
Проверка заполненности анкеты	50	0001:15:00:05	300,00	0,00	300,00
Выезд на встречу с клиентом	147	0014:12:21:58	882,00	882,00	1 764,00
Подготовка коммерческого предложения	277	0014:08:19:40	1 108,00	831,00	1 939,00
Подготовка заказа покупателя	277	0004:20:27:33	831,00	277,00	1 108,00
Выяснение причины отказа	94	0000:11:40:28	94,00	47,00	141,00
Согласование скидки	95	0001:15:29:55	475,00	142,50	617,50
Выставление счета на оплату	140	0001:11:10:13	280,00	420,00	700,00
Итого	1 449	0045:07:03:43	4 863,00	3 617,50	8 480,50

**Статистика использования ресурсов сотрудников  
в бизнес-процессе «привлечение клиента»**

Должность	Количество обработанных функций	Время работы, д:ч:м:с	Коэффициент использования	Количество человек
Секретарь	70	0000:11:55:58	0,07	1
Торговый представитель	50	0008:03:29:45	0,58	2
Телемаркетолог	157	0002:17:42:45	0,39	1
Менеджер по продажам	1 027	0030:02:38:09	0,72	6
Начальник отдела продаж	145	0003:19:17:07	0,54	1

В результате анализа статистических данных из табл. 4, полученных после прогона модели в пакетном режиме, стало очевидно, что функция «подготовка коммерческого предложения» является не только самым узким местом в реализации бизнес-процесса, но и самым затратным центром. Совокупная стоимость выполнения этой функции достигла 1 939 EUR, что является максимальным значением по сравнению с остальными функциями.

Анализ статистики использования ресурсов сотрудников, приведенной в табл. 5, позволяет говорить о высоких коэффициен-

тах загруженности менеджеров по продажам и торговых представителей и очень низком коэффициенте загруженности у секретаря.

**Методы оптимизации бизнес-процесса  
«привлечение клиента»**

Повышение эффективности бизнес-процесса можно осуществить несколькими способами – постепенное (инжиниринг) и кардинальное (ре-инжиниринг) методы совершенствования бизнес-процессов [6]. При совершенствовании бизнес-процесса может быть использован один из следующих приемов или их комбинация:



- автоматизация выполнения функции;
- изменение зон функциональной ответственности;
- снижение доли работ по проверке и контролю;
- минимизация согласований.

Автоматизация выполнения функции предполагает повышение степени информатизации функции и ведет к сокращению времени ее выполнения и к стандартизации выхода. По степени информатизации выделяют автоматизированные, интерактивные, экспертные и неавтоматизированные функции. Автоматические функции выполняются ЭВМ без участия человека, например составление стандартных отчетов или проведение математических расчетов. Интерактивные функции выполняются ЭВМ и человеком в диалоговом режиме, например реализация нестандартных запросов. Экспертные функции выполняются человеком на основе рекомендаций (команд), подготавливаемых ЭВМ. Неавтоматизированные функции выполняются человеком без использования ЭВМ.

Изменение зон функциональной ответственности – это возложение обязанностей по выполнению той или иной функции на другую организационную единицу. В дефектном процессе некоторые функции могут стоить слишком дорого из-за того, что они необоснованно выполняются высокооплачиваемыми сотрудниками. Такие функции называются затратными центрами. Обоснованность затрат на выполнение подобных функций определяется минимально необходимым уровнем компетентности ответственного сотрудника. Если для выполнения функции не требуется профессиональных знаний сотрудника, ее выполняющего, то такую функцию необходимо включить в зону ответственности более низкооплачиваемого сотрудника.

Снижение доли работ по проверке и контролю позволяет повысить скорость выполнения бизнес-процесса. Традиционные бизнес-процессы изобилуют операциями проверки и контроля, которые являются разновидностью бесполезной работы, поскольку не создают никаких ценностей, но тем не менее нужны для того, чтобы гарантировать

отсутствие нарушений. Все эти проверки требуют времени и сил – в некоторых случаях даже больших, чем сам бизнес-процесс.

Минимизация согласований обеспечивает непротиворечивость рабочих данных, а также повышает скорость выполнения бизнес-процесса. Согласование является другой разновидностью бесполезной работы, которую перепроектированный бизнес-процесс должен сводить к минимуму. Это достигается уменьшением числа точек внешнего контакта, имеющихся в бизнес-процессе, что приводит к снижению вероятности получения противоречивых данных, по которым, собственно, и требуется согласование.

Рассмотрим применение данных методов для бизнес-процесса «привлечение клиента». Анализ результатов имитационного моделирования, которые приведены в табл. 4 и 5, позволяет понять, насколько сильно загружен каждый из сотрудников работой, сколько денег и времени тратится на выполнение каждой из функций. Наиболее высокий коэффициент загрузки у торговых представителей и менеджеров по продажам.

Один из способов снижения загрузки торговых представителей состоит в приеме на работу дополнительных сотрудников. Работа торгового представителя одна из самых низкооплачиваемых, поэтому прием дополнительных сотрудников позволит повысить эффективность процесса без значительных финансовых затрат. Следует учитывать, что прием на работу одного дополнительного сотрудника обеспечит снижение загрузки торговых представителей и рост количества найденных клиентов, что в свою очередь повысит невысокий коэффициент загрузки телемаркетолога. В данном случае можно дать только вероятностную оценку повышения эффективности процесса. Точные расчеты показателей загрузки торговых представителей после приема на работу дополнительного сотрудника невозможны, так как прием дополнительного сотрудника повлечет за собой рост количества заказов, а рост количества заказов заставит производить моделирование процесса повторно с другими наборами входных данных.

Снять загруженность менеджеров можно аналогичным способом, но едва ли он будет экономически целесообразным. Кроме того, при анализе функций, выполняемых менеджером по продажам, были выявлены узкие места, тормозящие бизнес-процесс. Для снятия загруженности менеджеров по продажам и оптимизации бизнес-процесса «привлечение клиента» могут быть применены приемы автоматизации выполнения функции и изменение зон функциональной ответственности. Анализ результатов моделирования позволяет говорить о том, что менеджер по продажам выполняет множество функций, не требующих его знаний, которые можно переложить на секретаря, имеющего слишком низкий коэффициент загруженности. К таким функциям можно отнести «выяснение причины отказа» и «выставление счета на оплату». Подобный шаг является вполне обоснованным, так как стоимость выполнения функций секретарем будет значительно ниже, чем менеджером по продажам, кроме того, это позволит загрузить рабочее время секретаря в полном объеме.

Одна из самых затратных и продолжительных функций, требующих профессиональных знаний менеджера – «подготовка коммерческого предложения». Среднее время ее выполнения 1 час 15 мин, стоимость – 7 EUR. Данная функция подразумевает поэтапное выполнение типовых операций – открытие шаблона коммерческого предложения, исправление реквизитов клиента, расчет параметров продаваемой системы, сохранение полученного файла и отправление его по почте клиенту. В настоящее время данная функция выполняется сотрудниками вручную, поэтому ее можно отнести к неавтоматизированным.

Разработка или приобретение специального программного обеспечения, позволяющего генерировать коммерческое предложение автоматически, на основании типовых шаблонов и выполнять расчет параметров системы с помощью ЭВМ, позволит снизить время и стоимость выполнения данной функции и переведет ее в разряд экспертных, что подразумевает интерактивное выполнение функции человеком на основе рекомендаций и команд, подготавливаемых ЭВМ. Снижение времени выполнения функции приведет

к росту скорости обслуживания клиентов в целом, что должно благоприятно сказаться на лояльности клиентов.

Дальнейший анализ показал, что ряд функций, выполняемых менеджером по продажам, не требуют его профессиональных знаний. К ним относятся «выяснение причины отказа» и «выставление счета на оплату». Функция «выяснение причины отказа» заключается в звонке клиенту и фиксации причины отказа от работы с компанией. Функция «выставление счета на оплату» состоит из заполнения типовой формы счета на оплату реквизитами клиента и отправления этой формы по электронной почте или факсу. Ни одна из этих функций не требует профессиональных знаний менеджера по продажам, а значит выполняется им необоснованно. Анализ статистики коэффициентов загруженности сотрудников позволит включить данные функции в зону ответственности секретаря, имеющего слишком низкий коэффициент загруженности 0,07.

Подобная модификация зон функциональной ответственности будет являться вполне обоснованной, так как стоимость выполнения функций секретарем будет значительно ниже, чем менеджером по продажам. Заработная плата секретаря в среднем в 4 раза меньше, чем у менеджера по продажам.

### Выводы

Всесторонняя оценка полученных результатов имитационного моделирования бизнес-процесса «привлечение клиента» позволила выявить затратные центры, узкие места в реализации бизнес-процессов и неравномерную загруженность сотрудников. Цель оптимизации заключалась в поиске максимально эффективной реализации бизнес-процесса и была достигнута с помощью таких методов, как перераспределение коэффициентов загруженности должностей, автоматизация выполнения функции и изменение зон функциональной ответственности. Модификация зон функциональной ответственности оказалась одним из самых эффективных способов снижения стоимости бизнес-процесса. Причем снижение стоимости процесса таким способом позволяет оставить качество выполнения

процесса «привлечение клиента» на прежнем уровне, что является одним из обязательных требований оптимизации процессов, связанных с обслуживанием клиентов.

### Библиографический список

1. Хаммер, М. Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе: пер. с англ. / М. Хаммер, Дж. Чампи. – СПб.: Издательство СПб университета, 1997. – 332 с.
2. Бизнес-процессы: регламентация и управление / В.Г. Елиферов, В.В. Репин – М.: ИНФРА-М, 2006. – 319 с.
3. Моделирование бизнеса. Методология ARIS. / М.С. Каменнова, А.И. Громов, М.М. Ферапонтов и др. – 2001. – 333 с.
4. Шеер, Август-Вильгельм. Бизнес-процессы. Основные понятия. Теория. Методы / Август-Вильгельм Шеер. – М.: ООО «Издательство «Серебряные нити», 1999. – 152 с.
5. Шеер, Август-Вильгельм. Моделирование бизнес-процессов / Август-Вильгельм Шеер. – М.: Изд. АОЗТ «Просветитель», 2000. – 205 с.
6. Моделирование экономических систем и процессов. Опыт построения ARIS-моделей. / И.В. Войнов, С.Г. Пудовкина, А.И. Телегин – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 395 с.

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАЛОГОВЫХ СТАВОК

А.В. ТРЕГУБ, доц. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук

*tregub50@mail.ru*

В условиях развивающегося экономического кризиса перед многими экономистами, руководителями предприятий, государственными деятелями стоят вопросы: какие меры нужно предпринять, чтобы избежать спада производства, что надо сделать, чтобы минимизировать потери, связанные с этим кризисом?

Правительства ряда стран активно принимают различные меры по поддержке отечественного производителя. Для этого оказывается финансовая поддержка предприятий, решаются вопросы льготного кредитования, налогообложения.

В настоящей работе изучается вопрос о влиянии государственного налогообложения на деятельность предприятия. Изучаются меры правительства по поддержке отечественных экспортеров нефти.

Рассмотрим задачу максимизации прибыли предприятия в зависимости от изменяющегося акцизного налога.

Пусть цена единицы продукции  $v(x) = a - bx$ , т.е. линейно падает при увеличении объема реализуемой продукции  $x$ , а затраты  $I(x)$  зависят от объема продукции следующим образом:  $I(x) = cx^2 + dx + e$ , где  $a, b, c, d, e$  – некоторые положительные константы. Пусть налог является акцизом со ставкой  $r$ , т.е. с

каждой проданной единицы товара платится налог  $r$ , и вся налоговая сумма равна  $N = rx$ . При реализации продукции фирма получит прибыль

$$P(x) = x(a - bx) - (cx^2 + dx + e) - rx.$$

Чтобы максимизировать прибыль, найдем оптимальный объем продукции. В точке максимума  $P'(x) = 0$ .

Откуда

$$x_{\max} = (a - d - r) / (2(b + c)).$$

При этом

$$P''(x) = -2b - 2c < 0, P(x_{\max}) = (a - d - r)^2 / (4(b + c)) - e.$$

Будем считать, что  $x_{\max} > 0$ , что приводит к условию  $r < (a - d)$ .

Поскольку  $r > 0$ , то легко заметить, что при увеличении налога  $r$  происходит не только уменьшение прибыли предприятия, но и снижение оптимального объема реализуемой продукции, что, в свою очередь, ведет к росту цен на выпускаемую продукцию.

Найдем теперь налоговый доход государства

$$N(r) = rx_{\max} = r(a - d - r) / (2(b + c)).$$

В рассматриваемом случае кривая доходов государства представляет параболу, ветви которой направлены вниз (рис. 1). Максимум доходов достигается при налоге  $r^* = (a - d)/2$  и равен  $N(r^*) = (a - d)^2 / (8(b + c))$ .

Т а б л и ц а 1

**Добыча, реализация на внутреннем рынке и экспорт нефти, включая газовый конденсат (по данным Федеральной службы государственной статистики в 2008 г.)**

	2008 г.		Декабрь 2008 г., млн т	В % к	
	млн т	в % к 2007 г.		декабрю 2007г.	ноябрю 2008г.
Добыча	487,6	99,3	41,2	99,1	103,3
Реализация (переработка) на внутреннем рынке	236,3	103,2	19,4	96,1	96,2
Экспорт *	243,1	94,0	21,1	101,2	108,3
Доля экспорта в добыче (в %)	49,9		51,2		

\* По данным ФТС России с учетом внешней торговли с Республикой Беларусь.

Т а б л и ц а 2

**Сравнительные данные о добыче нефти без газового конденсата в Российской Федерации и ведущих странах-экспортерах нефти (тыс. баррелей в день)**

	2008 г.		
	декабрь	ноябрь	Октябрь
Россия	9696	9367	9741
Страны ОПЕК – всего*	30499	31098	31856
из них: Ирак	2353	2323	2276
Саудовская Аравия	8331	8789	9206

\* По данным публикации ОПЕК «Market indicators as at end: December-2008».

Итак, с увеличением налога доход государства сначала растет, а затем, достигнув своего максимума, начинает падать. Более того, при  $r > a - b - \sqrt{4e(b+c)}$  прибыль предприятия становится отрицательной, хотя доходы государства еще положительны. Это объясняется тем, что при построении модели не учитывался тот факт, что прибыль должна быть положительной. Если предположить, что предприятие не будет торговать себе в убыток и что в этом случае выпуск продукции станет равным нулю, то и доход государства также станет равным нулю.

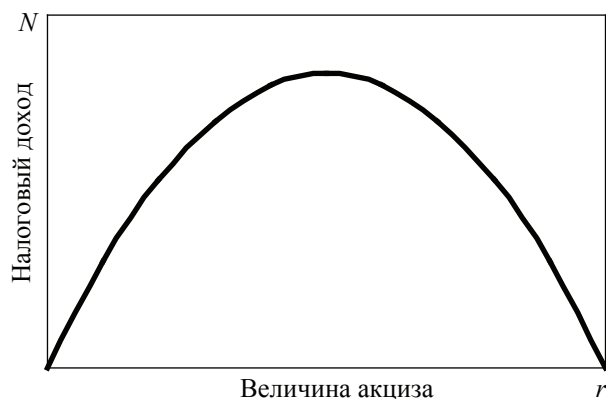


Рис. 1. Зависимость дохода государства от величины акциза

Таким образом, деловая активность предприятия, объем выпускаемой продукции и цены на нее тесным образом связаны с величиной налоговой ставки, регулируемой государством. При увеличении налоговой ставки прибыль предприятия падает, уменьшается объем выпускаемой продукции, цены на продукцию растут. Доход же государства при увеличении ставки налога может не только не увеличиваться, но наоборот уменьшаться.

Проанализируем деятельность правительства РФ на рынке нефти, рассмотрев динамику добычи и экспорта нефти за 2007–2008 гг. (рис. 2). На основе приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

- объем добычи нефти в России и ее экспорт не являются доминирующими на мировом рынке нефти и определяются, по видимому, производственными мощностями топливно-сырьевого комплекса и социально-экономическими показателями;
- объем добычи нефти в России и ее экспорт слабо зависят от конъюнктуры на мировом рынке нефти.

В соответствии со сделанными выводами будем считать объем добычи и экспорт нефти в России величинами постоянными.



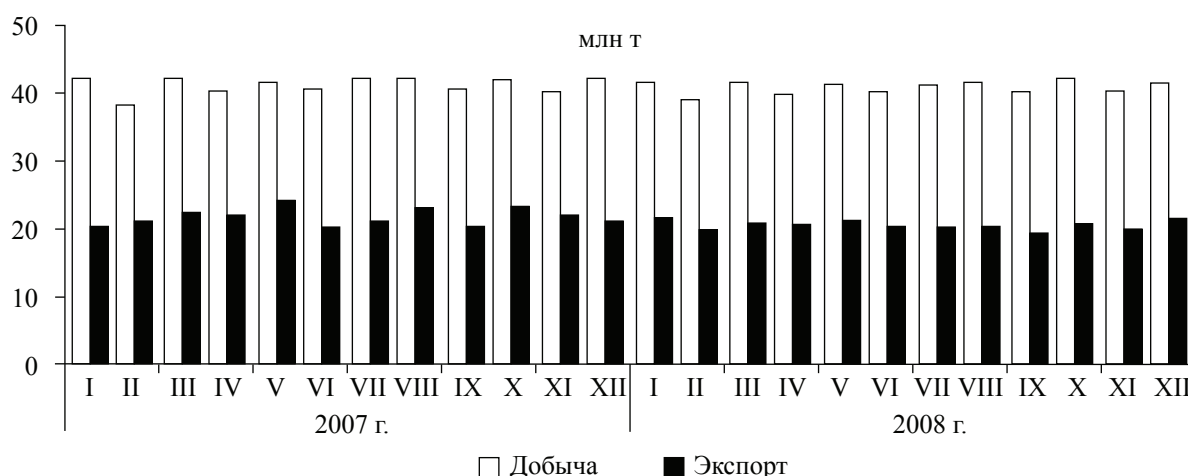


Рис. 2. Динамика добычи и экспорта нефти

Т а б л и ц а 3

**Изменение средних фактических экспортных цен Российской Федерации и мировых цен на нефть**

	Средняя фактическая экспортная цена		Средняя мировая цена на нефть «Юралс»*	
	долларов за тонну	в % к декабрю предыдущего года	долларов за тонну	в % к декабрю предыдущего года
2007 г.				
Январь	369,8	97,0	365,1	86,1
Февраль	357,1	93,7	393,5	92,9
Март	383,0	100,5	430,1	101,5
Апрель	422,5	110,9	466,0	110,0
Май	435,4	114,2	469,0	110,7
Июнь	458,7	120,4	496,1	117,1
Июль	492,2	129,2	542,5	128,0
Август	498,8	130,9	504,0	118,9
Сентябрь	491,7	129,0	539,1	127,2
Октябрь	533,7	140,0	581,6	137,2
Ноябрь	582,9	153,0	658,1	155,3
Декабрь	609,2	159,9	643,5	151,8
2008 г.				
Январь	613,9	100,8	653,6	101,6
Февраль	617,0	101,3	669,8	104,1
Март	662,9	108,9	729,1	113,3
Апрель	697,5	114,5	769,6	119,6
Май	764,6	125,6	867,7	134,8
Июнь	833,8	136,9	933,5	145,1
Июль	887,4	145,7	947,8	147,3
Август	815,5	133,9	814,8	126,6
Сентябрь	702,8	115,4	708,8	110,1
Октябрь	600,3	98,6	515,0	80,0
Ноябрь	442,1	72,6	373,3	58,0
Декабрь	325,8	53,5	286,6	44,5

\* По данным Минэкономразвития России.

В этом случае прибыль, полученная при экспорте нефти, будет равна

$$P(x_0) = x_0 v - I_0 - r x_0,$$

где  $r$  – таможенная пошлина на нефть;

$x_0$  – объем экспорта нефти;

$v$  – цена нефти;

$I_0$  – издержки производства и реализации.

Запишем последнее выражение в виде

$$P(x_0) = (v - r) x_0 - I_0.$$



Рис. 3. Изменение цен вывозных таможенных пошлин на нефть сырую

При постоянном объеме экспорта государство может регулировать величину прибыли экспортеров нефти путем изменения таможенной пошлины  $r$ . Для того, чтобы прибыль экспортеров нефти  $P(x_0)$  оставалась постоянной при неизменном объеме экспорта и изменяющихся мировых ценах на нефть, правительство должно поддерживать разницу между ценой на нефть и таможенной пошлиной  $v - r$  постоянной. При увеличении мировых цен на нефть таможенную пошлину нужно увеличивать (растет доход государства), при уменьшении – соответственно уменьшать (поддержка отечественного производителя). Посмотрим, как приведенные выше рассуждения реализуются на практике.

Согласно закону РФ о таможенном тарифе ставки вывозной таможенной пошлины на сырую нефть, устанавливаемые правительством, не должны превышать предельной ставки, рассчитываемой следующим образом: при цене нефти марки Urals до 109,5 долл./т – в размере 0 %, при превышении мировой цены на нефть уровня 109,5 долл./т, но не более 182,5 долл./т – 35 % от разницы между ценой на нефть и 109,5 долл., при цене на нефть больше 182,5 долл./т – в размере 25,53 долл./т и 40 % от разницы между сложившейся ценой и 182,5 долл./т.

Посмотрим, как менялись цены на нефть в 2007–2008 гг. (табл. 3).

Из приведенных данных видно, что цены на нефть за рассматриваемый период сначала росли, а затем с июля 2008 г. резко стали снижаться. Правительство РФ реагировало на изменение цен изменением таможенных пошлин.

При плавном увеличении цен на нефть новые таможенные пошлины вводились раз в два месяца. С июля 2008 г. цены на нефть резко стали падать. Правительство РФ осенью 2008 г. приняло ряд шагов по корректировке расчетов экспортных пошлин на нефть и нефтепродукты из-за продолжающегося снижения мировых цен на нефть. Так, период мониторинга цен на нефть марки Urals и, соответственно, срок установления экспортных пошлин был сокращен с двух до одного месяца в целях более оперативного реагирования на изменения мировой конъюнктуры. Как сообщила пресс-служба правительства РФ в ноябре 2008 г., глава Кабинета министров России Владимир Путин подписал постановление правительства, в котором дано поручение соответствующим ведомствам «к 1 декабря сего года подготовить предложения по разработке новой формулы ставки таможенной пошлины с привязкой к рыночной цене».

Подобная озабоченность правительства понятна. При незначительном изменении рыночных цен на нефть интервал пересмот-

ра таможенных пошлин раз в два месяца не сильно влияет на величину прибыли экспортеров нефти. Однако, если скорость изменения цены велика, постоянные величины таможенных пошлин в течение длительного срока могут оказаться губительными для экс-

портеров нефти в случае резкого уменьшения цены или невыгодными для правительства в случае ее увеличения. Рекомендации очевидны. Таможенные пошлины должны быть более тесно привязаны к ежедневно меняющейся цене на нефть.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Л.А. УРОШЛЕВ, студент МГУЛ

leonidyroshlev@list.ru

В данной статье рассматривается следующее уравнение

$$d^2(a(x)u) / dx + P(x)u = g(x) \quad (1)$$

со следующими граничными условиями  $u(0)=u, u(1)=\tilde{u}$ . Здесь и далее предполагается, что функции  $a(x)$ ,  $P(x)$ ,  $g(x)$  имеют конечное число точек разрыва 1 рода на интервале  $(0;1)$ , и в каждой точке разрыва имеют односторонние касательные с обеих сторон. Причем, если обозначить через  $D_1$  множество точек разрыва функции  $a(x)$ ,  $D_2$  и  $D_3$  – аналогичные множества для функций  $P(x)$  и  $g(x)$ , то выполняется  $D_2 \subseteq D_1, D_3 \subseteq D_1$ .

Для решения данной задачи, воспользуемся понятием обобщенного произведения функций.

### Определение 1

Обобщенным произведением функций  $a$  и  $b$ , называется функция  $[a \cdot b] = (a * f_\varepsilon) \cdot (b * f_\varepsilon)$ , где  $f_\varepsilon$  – последовательность обобщенных функций, сходящихся к  $\delta(x)$  при  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Такая последовательность называется дельтаобразной.

Однако для нашего случая, а именно для регуляризации функции с более чем одним разрывом, мы применим при использовании обобщенного произведения следующую функцию –  $F_\varepsilon = f_{\varepsilon, x_0} + f_{\varepsilon, x_1} + \dots + f_{\varepsilon, x_n}$ , где  $f_{\varepsilon, x_i}$  – дельтаобразная последовательность в соответствующей точке. Это позволяет легко перенести следующие две теоремы на случай функций с более чем одним разрывом.

### Определение 2

Определим следующее пространство  $D'([0,1]) = \{\vartheta \in D'(R); \text{supp} \vartheta \subseteq [0,1]\}$  – пространство обобщенных функций с носителем, лежащим внутри отрезка  $[0;1]$

### Теорема 1

При заданных условиях  $[a(x)u(x)]$  лежат в заданном определении 1 пространстве.

### Доказательство

Аналогично приведенному в [3].

### Теорема 2

Функции  $[a(x)\delta^{(k)}(x_0)]$ , где  $x_0$  – точка разрыва функции конечны тогда и только тогда, когда  $k = 0$ .

### Доказательство

Аналогично [3], для произвольной функции  $\theta(x) \in D(R)$ , рассмотрим следующую обобщенную функцию

$$\begin{aligned} \langle [a\delta_{x_0}^{(k)}], \theta \rangle &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon^{k+1}} \int \int_{RR} a(t-x)\varphi(t)\varphi^{(k)} \times \\ &\times \left( \frac{x-x_0}{\varepsilon} \right) \theta(x) dt dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon^k} \int \int_{RR} a(t-(\tau\varepsilon+x_0)) \times \\ &\times \varphi(t)\varphi^{(k)}(\tau)\theta(\tau\varepsilon+x_0) dt d\tau . \end{aligned}$$

Очевидно, что только при  $k = 0$  имеет место конечность данной функции при любом  $\theta$ .

### Теорема 3

Если функция удовлетворяют условиям Определения 1, тот это локально интегрируемая функция.

### Доказательство

Разобьем весь отрезок  $[0,1]$  на подотрезки  $[x_{k-1}, x_k]$  точками разрыва функции  $a(x)$ . На каждом из отрезков мы имеем дифференциальное уравнение с непрерывными коэффициентами, и, следовательно, на каждом из отрезков решение существует и непрерывно.

Сформируем следующую функцию

$$u(x) = \begin{cases} 0, & (-\infty, 0) \\ u_0, & [0, x_0) \\ u_n, \dots & (x_k, 1] \\ 0, & (1, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, полученная функция должна быть разрывной в точках разрыва функции  $a(x)$ , для того чтобы выполнялись условия

$$\lim_{x \rightarrow x_i+0} (a(x) \cdot u(x)) = \lim_{x \rightarrow x_i-0} (a(x) \cdot u(x))$$

и

$$\lim_{x \rightarrow x_i+0} (a(x) \cdot u(x))' = \lim_{x \rightarrow x_i-0} (a(x) \cdot u(x))',$$

необходимые для существования второй производной.

#### Теорема 4

Существует последовательность функций, для которой не выполняются условия равновесия.

#### Доказательство

Сначала рассмотрим случай одной точки разрыва на отрезке  $[0; 1]$ .

Из теории обыкновенных дифференциальных уравнений известно, что для полуотрезков  $[0; x_0)$  и  $(x_0; 1]$  имеет место равенства

$$u_1(x) = U(x) + V(x),$$

где

$$U(x) = C_1 u_1(x) + C_2 u_2(x),$$

а

$$V(x) = u_2 \int_{f_2} \frac{g \, dx}{W} - u_1 \int_{f_2} \frac{g \, dx}{W},$$

где  $u_1, u_2$  – частные решения однородного дифференциального уравнения (1);

$W$  – определитель Вронского.

Значит, как и в [3], имеем, что для единственности решения необходимо, чтобы был отличен от нуля следующий определитель

$$\begin{vmatrix} u^{(1)} & u^{(2)} \\ (u^{(1)})' & (u^{(2)})' \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Далее воспользуемся тем, что коэффициенты уравнения имеют на концах односторонние производные. Аппроксимируем каждый из коэффициентов односторонней касательной. Получим

$$\frac{d^2((a_1(x-x_0)+b_1)u)}{dx^2} + (a_2(x-x_0)+b_2)u = 0.$$

Далее будем рассматривать решения этого уравнения.

Сначала предположим, что  $a_1 \neq 0$ ,  $a_2 \neq 0$ .

Тогда решение представляется в виде

$$y = e^{h(x-x_0)} z \left( \frac{(x-x_0)-\mu}{\varphi} \right), \quad (4)$$

где

$$z(x) = F(a, b, x), \quad a = \frac{b_1 h^2 + 2a_1 h + b_2}{2a_1 h},$$

$$b = \frac{2a_1^2}{a_1^2} = 2, \quad h = \frac{\sqrt{-4a_2 a_1}}{2a_2} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}},$$

$$\mu = -\frac{b_1}{a_1}, \quad \varphi = -\frac{2a_1 a_2 h}{b_1 h^2 + 2a_1 h + b_2},$$

где  $F$  – решение вырожденного гипергеометрического уравнения (функция Куммера).

Для левой полуокрестности имеем

$$u^{(1)} = e^{h^{(1)}(x-x_0)} z \left( \frac{(x-x_0)-\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right)$$

и при

$$\lim_{x \rightarrow x_0-0} u^{(1)} = z \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right),$$

для правой –

$$u^{(2)} = e^{h^{(2)}(x-x_0)} z \left( \frac{(x-x_0)-\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right)$$

и

$$\lim_{x \rightarrow x_0+0} u^{(2)} = z \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right)$$

Для производных

$$u^{(i)} = e^{h^{(i)}(x-x_0)} z \left( \frac{(x-x_0)-\mu^{(i)}}{\varphi^{(i)}} \right), \quad i=1, 2$$

равных

$$(u^{(i)})' = h^{(i)} e^{h^{(i)}(x-x_0)} z \left( \frac{(x-x_0)-\mu^{(i)}}{\varphi^{(i)}} \right) + e^{h^{(i)}(x-x_0)} z' \left( \frac{(x-x_0)-\mu^{(i)}}{\varphi^{(i)}} \right) \left( -\frac{\mu^{(i)}}{\varphi^{(i)}} \right)$$

имеем

$$\lim_{x \rightarrow x_0-0} (u^{(1)})' = h^{(1)} z \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) + z' \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right)$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0+0} (u^{(1)})' = h^{(2)} z \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) + z' \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right),$$

тогда из (3) имеем

$$\begin{aligned} & z \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) \left( h^{(2)} z \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) + z' \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) \right) = \\ & = z \left( -\frac{\mu^{(2)}}{\varphi^{(2)}} \right) \left( h^{(1)} z \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) + z' \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) \left( -\frac{\mu^{(1)}}{\varphi^{(1)}} \right) \right). \quad (5) \end{aligned}$$



Легко показать, что существуют такие  $\mu^{(i)}$ ,  $\varphi^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$ , что уравнение выполняется. Следовательно, такие  $\mu^{(i)}$ ,  $\varphi^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$  определяют последовательность функций, для которых единственность нарушена. Для одной точки доказано.

Теперь предположим, что имеется несколько точек разрыва.

Рассмотрим полуинтервал  $[0; x_0)$ . Тогда решение представимо в виде  $u^{(0)} = Cu_1^{(0)} + V$ , где  $u_1(0) = 0$ ,  $\lim_{x \rightarrow x_0-0} V = 0$  – решение неоднородного уравнения. Далее рассмотрим полуинтервал  $[x_0; x_1)$ . Возьмем два решения, такие что  $u_1^{(1)}(x_0) = 1$ ,  $(u_1^{(1)})'(x_0) = 0$  и  $u_2^{(1)}(x_0) = 0$ ,  $(u_2^{(1)})'(x_0) = 1$ . Тогда очевидно, что любое решение на данном полуинтервале представимо в виде

$u^{(1)} = Cu_1^{(0)}(x_0-)u_1^{(1)} + C(u_1^{(0)})'(x_0-)u_2^{(1)} + V^{(1)}$ , где  $V^{(1)}$  – решение неоднородного уравнения.

Продолжая этот процесс, дойдем до последней точки разрыва. Далее, используя изложенные выше принципы, определяем разрешимость уравнения. Но так как аналогичный процесс применим и для правой границы отрезка  $[0; 1]$ , получаем, что если существует точка, где выполняются условия (5), то решение не единственно.

### Библиографический список

1. Зайцев, В.Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
2. Айнс, Э. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Э. Айнс. – М.: Факториал Пресс, 2005. – 640 с.
3. Gunther Hormann, Ljubica Oparnica. Distributional solution concepts for the Euler-Bernoulli beam equation with discontinuous coefficients. [http://arxiv.org/PS\\_cache/math/pdf/0606/0606058v4.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/math/pdf/0606/0606058v4.pdf).

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

Г.С. УТКИН, *проф. каф. автоматизации и управления МГУЛ, канд. техн. наук*,  
А.П. БАШАРИН, *асп. каф. автоматизации и управления МГУЛ*

*ugs@skypoint.ru*

Для того чтобы большие информационные системы могли сохранить работоспособность и не деградировать с ростом данных в системе или увеличением числа одновременно работающих пользователей, эти системы должны удовлетворять критериям масштабируемости. Проверить, удовлетворяет ли система данным критериям, поможет проведение нагрузочного тестирования (НТ) на ранних этапах разработки БИС. Это позволит избежать серьезных проблем в будущем, таких как наличие узких мест, мешающих производительности системы, наличие архитектурных дефектов в системе, не позволяющих увеличением аппаратных мощностей увеличить производительность. Данные проблемы, как правило, приводят к тому, что увеличение аппаратных мощностей не дает пропорционального увеличения производительности, а исправление таких проблем возможно только с изменением архитектуры, что ведет к переписыванию час-

ти компонент или самой БИС. В то же время изменение архитектуры уже внедренной в промышленную эксплуатацию информационной системы почти всегда неприемлемо в силу больших трудозатрат на изменение архитектуры, повторного тестирования функционала и проведения нагрузочных испытаний. Зачастую проще выбрать новую более производительную ИС.

Чтобы избежать описанных выше сложностей, а также выбрать оптимальную аппаратно-программную конфигурацию, на которой будет работать ИС, необходимо производить нагрузочное тестирование еще при разработке ИС. В идеале во время разработки самой ИС параллельно создается прототип, повторяющий архитектуру будущей программы, но без полной реализации бизнес-логики и функционала.

Данная статья призвана ответить на ряд вопросов, которые могут возникнуть при подготовке к НТ.

**Постановка задачи**

1. Вопросы, на которые должно ответить НТ.
2. Вопросы, на которые надо ответить, перед тем как приступить к НТ.
3. Критерии, по которым будет определяться программная производительность.
4. Критерии, по которым будет определяться аппаратная производительность.

**Вопросы, на которые должно ответить НТ**

Ответы на данные вопросы наиболее важны перед началом НТ, так как они задают «направление», в котором нужно проводить тестирование. А также определяют вопросы, ответы на которые и должно дать поведение конкретного НТ.

*1. Удовлетворяет ли система заявленным требованиям производительности при работе указанного числа пользователей?*

Соответствует ли время отклика системы при заданной интенсивности ожиданиям заказчика.

*2. Масштабируема ли система?*

Определить, масштабируема ли система, можно, если при увеличении интенсивности работы с системой ее производительность уменьшается линейно.

*3. Есть ли в системе «узкие» места и где именно они находятся?*

Определить, есть ли в системе архитектурные дефекты, которые не позволяют системе работать с максимальной производительностью, и где находится это место или что именно в системе является таким местом.

*4. Как ведет себя система на разном числе одновременно работающих пользователей, сколько максимально пользователей может работать с системой?*

Определить, какой максимум по одновременно работающим пользователям заложен в системе, а также определить верхние границы производительности системы, за которыми начинается деградация.

*5. Как ведет себя система при пиковой нагрузке?*

Определить поведение системы, когда нагрузка на нее достигает максимального значения в течение продолжительного периода.

Все вышеперечисленные вопросы определяют вид НТ, который необходимо провести. Некоторые виды НТ уже включают в себя другие виды НТ.

**Вопросы, на которые надо ответить, перед тем как приступить к НТ**

На данные вопросы надо ответить после того, как определен вид НТ. Это позволит сформировать максимально удовлетворяющий запросам профиль нагрузки.

Ответы на эти вопросы являются обязательными для приступить к НТ.

*1. Какие требования к производительности системы предъявляются заказчиками тестирования?*

Необходимо знать, какие требования к быстродействию системы предъявляет бизнес. Это основной вопрос, на который надо получить ответ, так как он показывает, на соответствие чему будет идти проверка.

*2. Сколько пользователей должно работать с системой?*

Данный критерий определяет, сколько подключенных пользователей должна выдерживать система.

*3. Сколько одновременно работающих пользователей должна выдерживать система?*

Критерий определяет, сколько из подключенных пользователей к системе должно проявлять активность.

*4. Как распределена по времени работа пользователей?*

Критерий используется для систем, с которыми работают пользователи из разных часовых поясов, или ряд операций в системе распределен во времени и не пересекается между собой.

Пример использования критерия, требование на систему. Система должна выдерживать работу 1000 пользователей (число пользователей всех филиалов). Данную нагрузку система не выдерживает. Но так как филиалы находятся в разных часовых поясах, одновременно с системой работает 700 пользователей. Данную нагрузку система выдерживает.

*5. Проверка выполнения каких операций наиболее важна для НТ?*

Данный вопрос должен определить набор операций, которые нужно будет включить в нагрузочный скрипт. Такими операциями могут быть критичные для бизнеса операции, «тяжелые запросы», запросы, выполняемые наиболее часто.

*б. Сколько времени на выполнение операции тратит пользователь?*

Критерий определяет временные задержки при выполнении нагрузочного скрипта.

### **Критерии, по которым будет определяться программная производительность**

Производительность системы определяется на основании времени отклика при выполнении операции с системой.

Время отклика – это время, которое затрачивает система между тем, когда пользователь обратился к системе и получил ответ.

Производительность зависит от интенсивности нагрузки на системы. В свою очередь интенсивность – это число обращений к системе в единицу времени.

Регулировать интенсивность возможно, увеличивая число одновременно работающих пользователей или уменьшая время задержки при выполнении операции уже работающими пользователями.

### **Критерии, по которым определяется аппаратная производительность**

При проведении нагрузочного тестирования необходимо контролировать не только время отклика при выполнении операций в системе, но также и загрузку аппаратных ресурсов. Наиболее распространенные для снятия метрики.

*Чтение диска* – метрика показывает, насколько занят физический дисковый. Как эмпирическое правило, счетчик времени диска должен показывать менее 55 %.

*Средняя длина очереди диска* – метрика показывает очередь на дисковых массивах. Если значение средней очереди превышает значение 2 для непрерывных периодов (свыше 10 минут в течение 24 часового мониторинга) для каждого дискового массива, то этот массив может оказаться узким местом производительности системы.

*Загрузка процессора* – метрика для слежения за использованием центрального процессора. Не должна превышать 80 % для непрерывных периодов.

*Использование виртуальной памяти* – метрика измеряет число страниц в секунду, которые сбрасываются из оперативной памяти на диск или считываются в оперативную память с диска. Чем более интенсивно происходит обмен страницами, тем большую нагрузку на операциях ввода/вывода испытывает сервер.

*Использование файла подкачки* – метрика показывает, сколько объема файла подкачки использует система. Как правило, если система стала использовать файл подкачки, то оперативная память, выделенная для работы программы, уже вся использована.

На основании использования аппаратных ресурсов можно сделать выводы о том, где в системе могут находиться узкие места.

«Узкое» место то, из-за которого производительность системы не может достичь своего максимума.

Набор метрик, получаемых при НТ, может быть самым разным и зависит от типа системы, ее архитектуры, компонентов, на которых она построена, операционной системы, аппаратной архитектуры и прочих вещей. Выше приведены базовые метрики, отслеживание которых наиболее важно.

### **Заключение**

В заключение хочу отметить, что ответы на перечисленные выше вопросы позволят определить направление НТ, определить перечень вопросов, на которые должно ответить НТ, и создать тестовые скрипты и профили нагрузки, направленные на получение нужных ответов. Это позволит избежать излишних работ и исключить получение результата, который не важен заказчику.

### **Библиографический список**

1. HPVirtualUserGenerator User's Guide Manufacturing Part Number:T7182-90012
2. Технология нагрузочного тестирования информационных систем с большим объемом данных. [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http://www.oracle.ru/communities/gen\\_load\\_test\\_it.htm](http://www.oracle.ru/communities/gen_load_test_it.htm) 10.01.2009.

3. Практические аспекты нагрузочного тестирования. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://ashirobokov.blogspot.com/2008/12/blog-post.html> 20.12.2008.
4. Проблематика нагрузочного тестирования компонентов биллинговых систем [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.software-testing.ru/library/testing/performance-testing/82-billing-performance> 21.01.2009.
5. Нагрузочное тестирование Web-приложений при помощи IBM Rational Performance Tester [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/r-1211\\_lee-tham1/index.html](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/r-1211_lee-tham1/index.html) 04.01.2009.
6. Терминология. Нагрузочное тестирование. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.software-testing.ru/library/testing/performance-testing/69-2008-10-13-19-00-07> 20.12.2008.
7. Нагрузочное тестирование в MS Visual Studio 2005. [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http://art.thelib.ru/internet/game/nagruzochnoe\\_testirovanie\\_vnb\\_pms\\_vi\\_ual\\_studio\\_2005.html](http://art.thelib.ru/internet/game/nagruzochnoe_testirovanie_vnb_pms_vi_ual_studio_2005.html) 04.01.2009.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСХОДЯЩЕЙСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПОЛИНОМЫ ЧЕБЫШЕВА

А.В. ШМАКОВ, доц. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук

*caf-math@mgul.ac.ru*

Рассмотрена плоская, нестационарная задача гидродинамики. Бесконечно длинный, жесткий цилиндр радиуса  $R$ , окружен идеальной сжимаемой жидкостью. На границе цилиндра задано давление, зависящее от времени и угловой координаты. Для определения параметров расходящейся волны использована система уравнений идеальной сжимаемой жидкости, записанная в безразмерном виде в цилиндрической системе координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial r}, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P$  – давление в жидкости;

$V, U$  – нормальная и тангенциальная скорость жидкости;

$r, t, \varphi$  – текущий радиус, время, полярный угол.

В качестве масштабов выбраны величины:

$$[P] = \rho a^2, [V, U] = a, [t] = R / a, [r] = R,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$a$  – скорость звука в жидкости;

$R$  – радиус.

Решение системы (1) ищем в виде разложения в ряд Фурье по угловой координате

$$\begin{aligned} V(r, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} V_n \cos(n\varphi), \\ U(r, \varphi, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\varphi), \\ P(r, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} P_n \cos(n\varphi). \end{aligned}$$

После исключения из третьего уравнения системы (1) скоростей  $V$  и  $U$ , для  $n$ -й гармоники ряда получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_n}{\partial t} = -\frac{\partial P_n}{\partial r}, \quad \frac{\partial U_n}{\partial t} = \frac{n}{r} P_n, \\ \frac{\partial^2 P_n}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P_n}{\partial r} \right) - n^2 P_n = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим расходящуюся акустическую волну, распространяющуюся от границы  $r = 1$ . Уравнение фронта расходящейся волны определяется соотношением  $t - r + 1 = 0$ . Введем новую переменную  $z = (t + 1) / r$ . Значениям  $z < 1$  соответствуют точки перед фронтом расходящейся волны, возмущения в которых будем считать равными нулю. Значение  $z = 1$  соответствует фронту волны, на котором значения давления и скорости считаем равными нулю. Для определения параметров  $P_n, U_n, V_n$  за фронтом волны ( $z > 1$ ) перепишем систему уравнений (2) относительно переменной  $z$

$$\begin{aligned} \frac{dV_n}{dz} = z \frac{dP_n}{dz}, \quad \frac{dU_n}{dz} = nP_n, \\ (z^2 - 1) \frac{d^2 P_n}{dz^2} + z \frac{dP_n}{dz} - n^2 P_n = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Дополним систему уравнений (3) условиями на фронте волны  $z = 1$

$$P_n(1) = 0, V_n(1) = U_n(1) = 0, n = 0, 1, 2, \dots$$

С учетом условий на фронте волны решение системы уравнений (3) имеет вид

$$\begin{aligned} P_0(z) &= B_0 \text{Arch}(z); \\ V_0(z) &= B_0 U_1^*(z); \\ P_1(z) &= B_1 U_1^*(z); \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_1(z) &= (B_1 / 2)(T_1^*(z)U_1^*(z) + \text{Arch}(z)); \\ U_1(z) &= (B_1 / 2)(T_1^*(z)U_1^*(z) - \text{Arch}(z)); \\ P_n(z) &= B_n U_n^*(z); \\ V_n(z) &= \frac{B_n}{2} \left( \frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(z) + \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(z) \right); \\ U_n(z) &= \frac{B_n}{2} \left( \frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(z) - \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(z) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $T_n^*(z)U_n^*(z)$  – полиномы Чебышева первого и второго рода для  $z \geq 1$ :

$$\begin{aligned} T_n^*(z) &= \frac{1}{2} \left( (z + \sqrt{z^2 - 1})^n + (z - \sqrt{z^2 - 1})^n \right); \\ U_n^*(z) &= \frac{1}{2} \left( (z + \sqrt{z^2 - 1})^n - (z - \sqrt{z^2 - 1})^n \right), \end{aligned}$$

где  $B_n$  – коэффициенты интегрирования.

В работе [1] построено решение волнового уравнения на основе частных решений. В настоящей работе этот подход распространен на случай системы уравнений гидродинамики. Используя частные решения (4), решение системы уравнений (2) ищем в виде

$$\begin{aligned} P_0(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \omega_{p0}(\tau) \text{Arch}(\xi_1) d\tau; \\ V_0(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \omega_{v0}(\tau) U_1^*(\xi_1) d\tau; \\ P_1(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \omega_{p1}(\tau) U_1^*(\xi_1) d\tau; \\ V_1(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{v1}(\tau)}{2} (T_1^*(\xi_1)U_1^*(\xi_1) + \text{Arch}(\xi_1)) d\tau; \\ U_1(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{u1}(\tau)}{2} (T_1^*(\xi_1)U_1^*(\xi_1) - \text{Arch}(\xi_1)) d\tau; \\ P_n(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \omega_{pn}(\tau) U_n^*(\xi_1) d\tau; \quad (5) \\ V_n(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{vn}(\tau)}{2} \left( \frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(\xi_1) + \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(\xi_1) \right) d\tau; \\ U_n(r,t) &= \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{un}(\tau)}{2} \left( \frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(\xi_1) - \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(\xi_1) \right) d\tau, \end{aligned}$$

где  $\xi_1 = (t - \tau + 1) / r$ ,

Неизвестные переходные функции  $\omega_{pn}(\tau)$ ,  $\omega_{vn}(\tau)$ ,  $\omega_{un}(\tau)$  связаны между собой зависимостями, которые получаются после подстановки (5) в (2) для  $n$ -й гармоники разложения

$$\begin{aligned} \omega_{v0}(\tau) &= -\omega_{p0}(\tau); \\ \omega_{vn}(\tau) &= \omega_{un}(\tau) = -\omega_{pn}(\tau). \end{aligned}$$

Для определения неизвестных переходных функций используется граничное условие при  $r = 1$ . В случае, если на границе  $r = 1$  задан закон изменения давления от времени, то переходные функции  $\omega_{pn}(\tau)$  определяются из интегральных уравнений

$$\begin{aligned} \int_0^t \omega_{p0}(\tau) \text{Arch}(\xi) d\tau &= P_0(1,t); \\ \int_0^t \omega_{pn}(\tau) U_n^*(\xi) d\tau &= P_n(1,t), n \geq 1, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\xi = 1 - t + \tau$ ,  $P_0(1,t)$ ;

$P_n(1,t)$  – коэффициенты разложения давления по угловой координате на границе  $r = 1$ .

Аналогичным образом вычисляются неизвестные переходные функции в случае, если на границе задан закон изменения скорости.

Получено аналитическое решение плоской, нестационарной задачи гидродинамики идеальной сжимаемой жидкости в предположении, что значения давления и скорости на фронте волны равны нулю. Методика может быть использована для решения нестационарной задачи гидроупругости.

### Библиографический список

1. Смирнов, В.И. ДАН СССР, 1937. – Т. 14. – № 1.

## ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ПРЕДЛОЖЕНИЯ НА РЫНКЕ ИТ-АУТСОРСИНГА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СХОДСТВА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КОМПАНИЙ-ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

И.А. МАЛИНОВСКИЙ, асп. Государственного университета – Высшей школы экономики

*ilia.malinovsky@gmail.com*

На рынке аутсорсинга отмечается появление нового типа услуг – аутсорсинг бизнес-процессов (АБП). Аутсорсинг бизнес-процессов (АБП) обозначает передачу одного или нескольких вычислительно емких биз-

нес-процессов (БП) в управление на сторону [1]. Вычислительная емкость процесса подразумевает зависимость исполнения бизнес-процесса от наличия определенных ИТ-ресурсов как аппаратного, так и программного

типа. Стороннее управление БП выражается в частичной или полной передаче функций планирования, исполнения и контроля, а также предоставлении отчетности обслуживающей компанией перед обслуживаемой.

АБП является закономерным развитием ИТ-аутсорсинга, перенимая у последнего предмет аутсорсинга – ИТ-ресурсы компании, но при этом применяя разработанные подходы к новому объекту – бизнес-процессам. Данное изменение фокуса связано с инфраструктурной ролью ИТ-ресурсов, по средством которых реализуется жизнедеятельность компании.

Особенностью формирования рыночного предложения АБП является необходимость позиционирования услуг в соответствии со сложившейся на рынке потребностью предприятий, анализ которых сторонними компаниями затруднен в связи с ограниченным раскрытием информации. Это делает необходимым использование альтернативных источников информации, доступ к которым возможен в рамках деятельности компании-поставщика услуг ИТ-аутсорсинга. В настоящей работе в качестве такого источника информации предлагается использовать БП компаний-потребителей (или потенциальных потребителей или типовые процессы компаний) услуг ИТ-аутсорсинга, доступ к которым может быть получен в рамках оказания услуг или в результате дополнительных исследований (например консалтинговыми компаниями) и запросов информации.

Согласно идее сравнительного анализа БП компаний-потребителей услуг ИТ-аутсорсинга целесообразно осуществлять капиталовложения в разработку методов и средств сбора и поиска схожих фрагментов БП в разных предприятиях, с тем чтобы в дальнейшем фокусировать рыночное предложение на основе обнаруженных схожих фрагментах. Схожесть фрагментов БП во-первых, косвенно сигнализирует о неспецифичности процесса среди множества предприятий, а следовательно, в большей склонности предприятий к аутсорсингу именно данного фрагмента [2]. Во-вторых, частота появления фрагмента БП говорит о потенциальном объеме рынка аутсорсинга данного фрагмента. В-третьих, схо-

жие фрагменты БП требуют схожих решений с точки зрения ИТ-услуг, что делает возможным компании-поставщику ориентироваться на прошлые решения при формировании новых предложений, более четко позиционируя портфель услуг на рынке, достигать экономии от увеличения масштаба деятельности и унификации вида деятельности.

Для решения задачи сравнения БП была разработана метрика на основе отношения симуляции, что было описано в работе [3].

#### **Анализ критериев выбора стратегии выполнения бизнес-процессов**

Анализ критериев выбора стратегии выполнения бизнес-процессов показал, что существующая тенденция – передача на аутсорсинг тех процессов и соответствующих им ИТ-услуг, которые не являются ключевыми. Ключевые бизнес-процессы определяют сильные стороны предприятия, дифференцируют его от конкурентов. Аутсорсинг таких процессов лишает предприятие контроля и повышает риск потери конкурентных преимуществ [2]. Таким образом, чем больше сходство бизнес-процессов между разными предприятиями, тем больше вероятность того, что они не являются ключевыми, а следовательно, меньше риск аутсорсинга ИТ-услуг, им соответствующих.

Другой подход к анализу критериев принятия решения об аутсорсинге представляет транзакционная теория [4]. Исходя из ее предпосылок предприятие выбирает такую форму управления деятельностью, которая минимизирует затраты на ее осуществление. В этом смысле аутсорсинг или внутренняя реализация – это выбор между двумя формами организационного устройства, а сопутствующие затраты составляют как операционные расходы, так и транзакционные издержки. Гипотеза транзакционной теории в применении к ИТ-аутсорсингу состоит в том, что ИТ-инфраструктура способна снизить транзакционные издержки и тем самым будет способствовать развитию аутсорсинга как организационной формы устройства предприятия. Из гипотезы транзакционной теории следует, что на аутсорсинг передается та деятельность, которая менее

всего сопряжена с необходимостью задействовать специфичные активы. Под активами понимаются как бизнес-процессы, так и человеческие ресурсы, физические объекты и др. Действительно, с ростом специфичности бизнес-процесса, переданного на аутсорсинг, для потребителя возрастает роль поставщика и риск его возможного оппортунистического поведения в будущем. Для снижения этого риска потребители менее склонны передавать в аутсорсинг высокоспецифичные процессы для их бизнеса. Специфичность бизнес-процесса косвенным образом отражается на относительной степени сходства его среди всех процессов других предприятий. Рост сходства БП (или фрагмента БП) дает основание предположить, что этот процесс менее специфичен, чем процесс, менее схожий среди данной выборки предприятий.

С точки зрения поставщика выгодна стандартизация предоставляемых ИТ-услуг, так как при этом может быть достигнута экономия от увеличения масштаба или унификации вида деятельности [5]. Стандартизация предложения и ИТ-услуг будет тем больше, чем более распространенным бизнес-процессам оно соответствует, т.е. таким БП, которые схожи среди разных предприятий. Более того, высокая частота проявления схожего фрагмента бизнес-процесса среди ряда предприятий сигнализирует о потенциально широком рынке сбыта услуг по аутсорсингу именно этого фрагмента.

При этом ключевыми факторами успеха являются, с одной стороны, широкий портфель услуг, детально покрывающий бизнес-процессы, а с другой стороны, реализация экономии на масштабе, что эквивалентно фокусу на распространенных бизнес-процессах и стандартизации предложения в рамках сходных процессов. Стандартизация предложения позволяет привлечь большее количество потребителей среди средних и мелких компаний, так как снижает их затраты на поиск и выбор решения.

#### **Описание подхода к определению тенденций на рынке аутсорсинга**

Для демонстрации подхода к определению тенденций на рынке аутсорсинга было

разработано программное средство с использованием коммерческих и общедоступных компонент. В качестве репозитория БП был использован MS Access. Репозиторий спецификаций БП предназначен для хранения спецификаций БП, значений величин сходства элементов БП, данных об услугах аутсорсинга, оказываемых для БП.

Для наполнения репозитория спецификациями БП было выбрано 176 процессных моделей из свободно распространяемого результата проекта Массачусетского инженерного института [6], посвященного сбору и анализу спецификаций процессов и включающему как процессы коммерческих предприятий (например таких, как 3M, AT&T, Citybank, Land Rover, Xerox и другие), так и данные из библиотек референтных и эталонных процессов (например таких, как APQC, SCOR и другие).

Процессы в репозитории охватывают период с 1999 по 2003 гг. Все описания даны на английском языке.

Рассмотренные 176 процессов состояли из 1505 элементов вида «операция» и 1392 элементов вида «связь». Конечным результатом применением метрики для выбранных процессов стала матрица значений сходства элементов бизнес-процессов размером  $1505 \times 1505$ .

Для анализа полученных результатов для каждого процесса было необходимо установить степень его стандартизации и распространенности. Необходимо отметить, что все результаты анализа являются справедливыми в относительном смысле, то есть в отношении.

В качестве меры стандартизации было вычислено усредненное сходство процесса как отношение суммы значений сходства процесса к количеству всех процессов, с которыми значение сходства не равно нулю. Среднее сходство процесса отражает степень стандартизации процесса, так как оно тем больше, чем больше значение сходства процесса с другими.

В качестве меры распространенности процесса была вычислена взвешенная сумма значений сходства процесса и меры стандартизации (рис. 1).

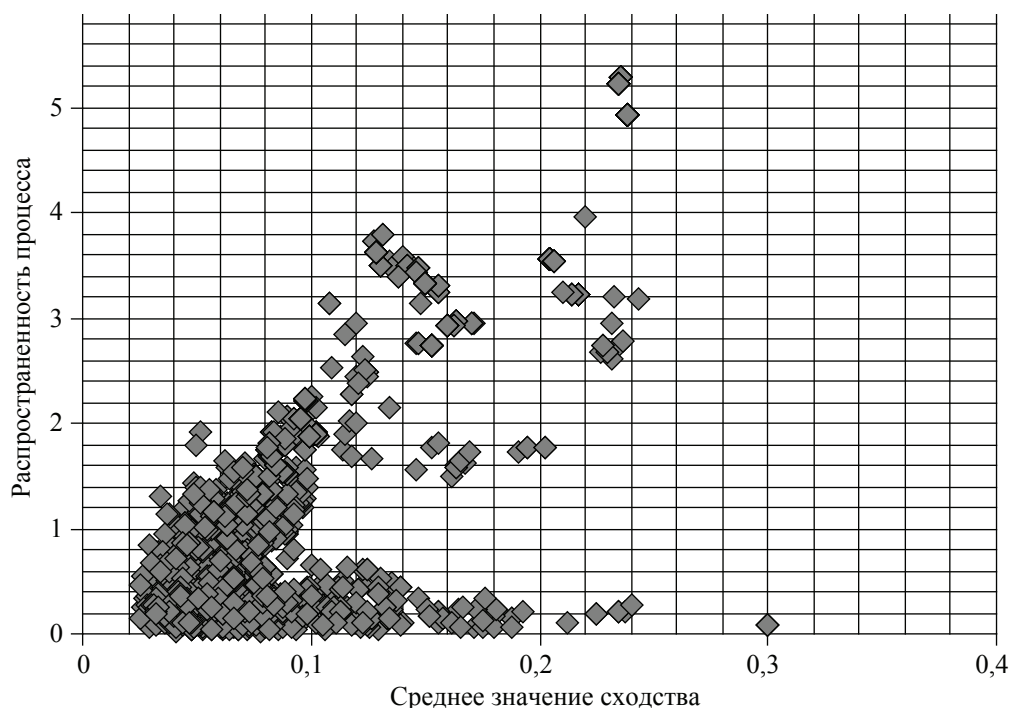


Рис. 1. Анализ результатов (вся выборка БП): стандартизация и распространенность процессов

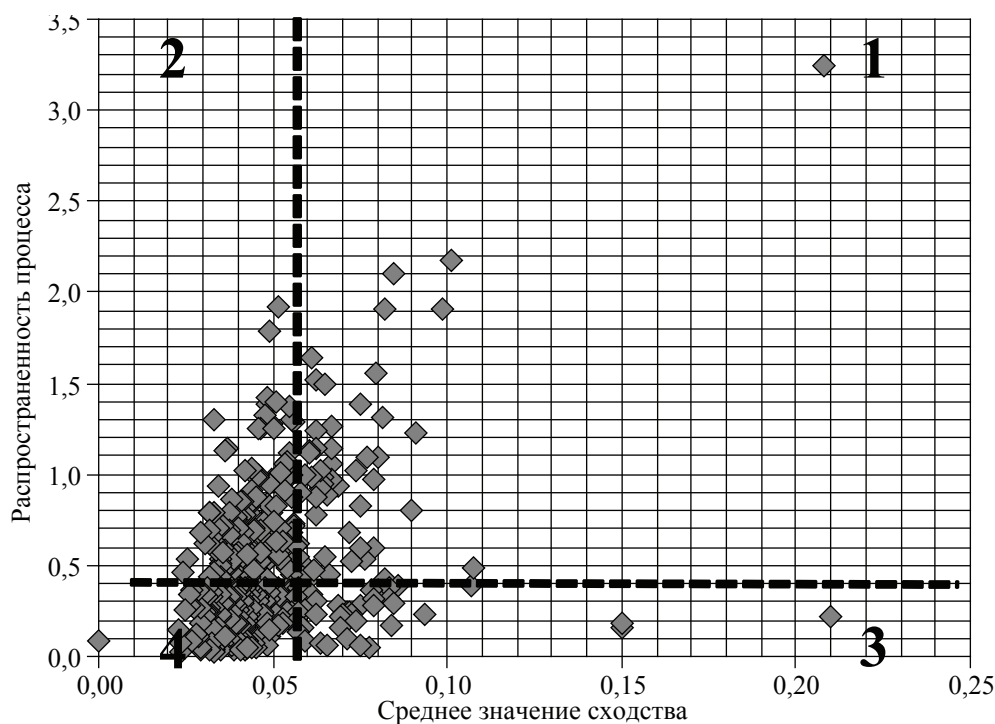


Рис. 2. Анализ результатов (только уникальные операции БП): стандартизация и распространенность процессов

Из всего множества рассмотренных операций были выделены 594 уникальных описания. Затем с использованием значений степени стандартизации и распространенности они были кластеризованы на 5 групп. В нулевую группу попали те операции, описание которых содержит менее трех слов и является общим,

что не позволяет делать каких-либо содержательных выводов (например «Buy», «Sell» и другие). Оставшиеся операции были разбиты на четыре группы по принципу нахождения 50 % перцентилей для значений сходимости и распространенности. Распределение операций, с уникальными описаниями, показано на рис. 2.



Распределение процессов по 4 группам позволяет условно описать процессы следующим образом.

Группа 1. Процессы распространены и стандартизованы, что позволяет назвать их основными кандидатами на аутсорсинг. Среди процессов этой группы можно выделить подгруппу, составленную из вспомогательных процессов, распространенных в любом бизнесе: Управление персоналом, Управление финансами, Управление информационными технологиями, Управление качеством, Управление цепочками поставок, Управление взаимоотношениями с клиентами. К настоящему времени рынок аутсорсинга процессов данного типа считается сформированным. При разработке предложения на рынке аутсорсинга ИТ-услуг, компания-поставщик должна предоставить портфель продуктов, покрывающий задачи данных процессов. Необходимый функционал может быть обеспечен соответствующими ERP-системами или специализированными системами. С другой стороны, в этой группе с большой вероятностью могут находиться ключевые процессы, которые в силу своей природы имеют низкую тенденцию к аутсорсингу: Управление бизнесом, Разработка бизнес модели, Разработка продукта. Процессы данного вида по своей природе противоречат идее аутсорсинга.

Группа 2. Процессы распространены, но плохо стандартизованы. Из этого следует, что для процессов данной группы необходимо следить за тенденциями в области стандартизации: действия независимых агентств по стандартизации, появлению их в пакетах программных приложений и т.д. В то же самое время различия процессов данной группы может означать, что компания посредством различий получает конкурентное преимущество. В группу 2 вошли процессы, которые являются более специфичными относительно первой группы: управление вертикальными ИТ-решениями, управление налогами, разнообразные конкретные схемы получения заказов и доведения продуктов до потребителя и другие.

Группа 3. Процессы стандартизованы, но плохо распространены. Необходимо следить за потребностью компаний в процессах такого рода. Маркетинговая деятельность

должна быть направлена на создание рынка потребностей в процессах этой группы. Группа 3 состоит из процессов, большей частью связанных с развитием возможностей благодаря сети Интернет в следующих областях: сбор информации о потребителях, реклама, доставка контента и другие.

Группа 4. Процессы не стандартизованы и не распространены.

В целом модель подтвердила картину рынка аутсорсинга, а также некоторые тенденции несмотря на то, что использованная коллекция БП не может быть названной репрезентативной. Исходя из этих результатов можно сделать вывод о хорошей предсказательной силе разработанной модели, и следовательно, о ее практической пользе для компаний-поставщиков услуг ИТ-аутсорсинга в качестве инструмента установления тенденций на рынке ИТ-аутсорсинга.

### Описание подхода к формированию предложения на рынке аутсорсинга

Как было сказано выше, другой задачей, для решения которой предназначена модель, является формирование предложения для компании на основе оценки сходства ее процессов с процессами других компаний-потребителей. Проиллюстрируем работу модели сравнения на примерах. Пусть имеется процесс «Контроллинг», схема которого следующая дана на рис. 3.

Пусть также существует спецификация процесса «Управление контрактами и рекламациями» (рис. 4).

Результаты применения метрики для вычисления схожести к элементам процессов приведены в таблице.

Т а б л и ц а

#### Результат вычисления значений метрики

	К.1	К.2	К.3	К.4	К.5
УКиР.1	15 %	17 %	0 %	0 %	0 %
УКиР.2	15 %	0 %	35 %	0 %	0 %
УКиР.3	15 %	0 %	1 %	4 %	0 %
УКиР.4	15 %	0 %	2 %	3 %	1 %
УКиР.5	23 %	17 %	0 %	19 %	27 %
УКиР.6	0 %	21 %	15 %	0 %	2 %
УКиР.7	0 %	0 %	50 %	17 %	15 %
УКиР.8	0 %	0 %	15 %	20 %	15 %
УКиР.9	0 %	0 %	15 %	15 %	29 %

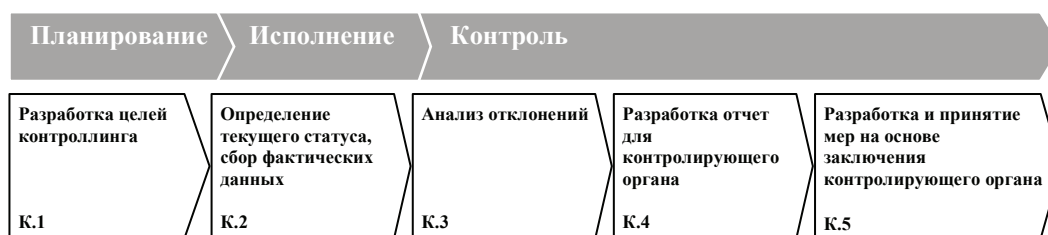


Рис. 3. Бизнес-процесс «Контроллинг»

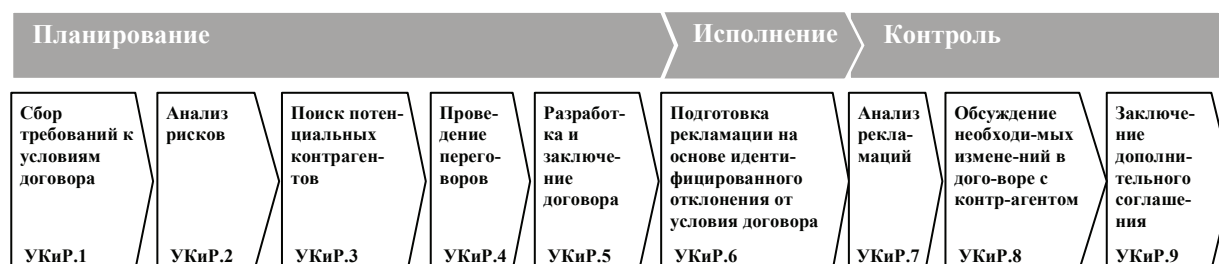


Рис. 4. Бизнес-процесс «Управление контрактами и рекламациями»

Наибольшее значение сходства подпроцесс «Разработка целей контроллинга» достигает с подпроцессом «Разработка и заключение договора». Схожесть этих двух этапов может быть проиллюстрирована, например, идеей соглашения об уровне сервиса для субъекта контроля, в качестве реализации подпроцесса «Разработка целей контроллинга».

Анализ схожести также показывает, что подпроцесс «Анализ отклонений» играет схожую роль, что и подпроцесс «Анализ рекламаций». Эти подпроцессы отвечают на вопрос, «что делать, если обнаружено отклонение».

Из рассмотренных примеров видно, как предложенный подход позволяет идентифицировать семантически сходные фрагменты бизнес-процессов и использовать их в качестве источников информации при разработке предложения на рынке ИТ-аутсорсинга.

### Заключение

В настоящей работе описаны подходы, позволяющие решить две взаимосвязанные

задачи формирования предложения на рынке ИТ-аутсорсинга: определение тенденций на рынке и формирование предложения на основе обнаружения схожих фрагментов между процессами компаний-потребителей услуг.

### Библиографический список

1. The eSCM-SP v2.01: Model Overview. The eSourcing Capability Model for Service Providers (eSCM-SP) v2.01[PDF]. [Электронная версия]: Режим доступа: <http://itsqc.cmu.edu/>.
2. Chakrabarty, S. Strategies for Business Process Outsourcing: An Analysis of Alternatives, Opportunities and Risks // Journal of E-Business Process Management: Technologies and Solutions, 1 ed. Hershey, PA: IGI Publishing.– 2007. – P. 204–229.
3. Грекул, В.И. Методы измерения подобия бизнес-процессов / В.И. Грекул, И.А. Малиновский // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 4.
4. Benoit, A. Auberta, Suzanne Rivarda, Michel Patry A transaction cost model of IT outsourcing // Information and Management.– 2004.– N 41.– P. 921–932.
5. The Fast-Developing World Of BPO [PDF]. [Электронная версия]: Режим доступа: <http://www.sourcinginterests.org>.
6. The Process Recombinator: A Tool For Generating New Business Process Ideas // Information & Management.– 2004.– N 41.– P. 921–932.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АБОНЕНТОВ В ГОРОДСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

Д.Б. АФОНИН, *асп. каф. вычислительной техники МГУЛ*

*chindi@chindi.su*

**В** данной статье приведен общий обзор некоторых технологий идентификации абонентов в городских компьютерных сетях.

Городские компьютерные сети характеризуются значительной территориальной распределенностью, сравнительно большим количеством конечных точек подключения (абонентов) и, следовательно, затрудненной контролируемостью доступа этих абонентов в сеть. Основной проблемой при этом становится определение неавторизованных (не разрешенных оператором) подключений к городской сети и отслеживание и протоколирование изменений сетевых реквизитов авторизованными абонентами.

### **Технологии городских компьютерных сетей и проблема идентификации пользователей**

В России городские компьютерные сети в основном строятся по двум взаимосоключающим технологиям: по технологии Ethernet либо на базе системы кабельного телевидения.

Сети, построенные на базе кабельного телевидения, обычно строятся в городах, где уже развернута и функционирует телевизионная кабельная сеть. Финансовые затраты на развертывание компьютерной сети в таком случае сравнительно невелики. Однако, строго говоря, коаксиальные кабели, применяемые для передачи аналогового телевизионного сигнала, для высокоскоростной передачи цифровых данных по своим характеристикам сильно уступают технологии Ethernet. Так что сети на базе кабельного телевидения обычно характеризуются сравнительно небольшой пропускной способностью.

Городская компьютерная сеть, построенная на базе кабельного телевидения, обычно состоит из так называемой головной станции и абонентов, подключенных к этой сети через специальный адаптер, непосредственно осуществляющий идентификацию

абонента и преобразующий цифровой сигнал в аналоговый, пригодный для передачи по коаксиальным проводам. Идентификационная информация об абоненте в этих адаптерах программируется непосредственно оператором городской сети, и технология программирования обычно держится в тайне, так что можно сказать, что проблема идентификации абонентов для городских сетей в общем случае не стоит.

Иначе дело обстоит с сетями, построенными по технологии Ethernet. Характерной чертой этой технологии с точки зрения безопасности является «равноправность» абонентов, то есть любой подключенный к одному Ethernet-сегменту (далее VLAN-у) компьютер может выходить в сеть из-под сетевых реквизитов любого другого подключенного к этому VLAN-у компьютера. Это может быть сделано как непреднамеренно (например, в результате ошибки пользователя или действия компьютерных вирусов), так и осознанно (например с целью несанкционированного подключения к сети или для компрометирования добропорядочных абонентов).

В любом случае такие факты необходимо уметь фиксировать и адекватно и своевременно реагировать на них.

### **Технологии идентификации пользователей**

Процесс фиксации фактов заключается в определении и протоколировании несанкционированной сетевой активности компьютеров и определении конкретных личностей, ответственных за это.

Точки подключения к городской сети, построенной по технологиям Ethernet и TCP/IP, однозначно идентифицируются тремя параметрами – VLAN-ом (а также IP-подсетью, связанной с ним), аппаратным адресом (MAC-адресом) и IP-адресом. Первые два – это Ethernet-уровень, а IP-адрес – это IP-уро-

вень. В некоторых случаях сети не делятся на отдельные Ethernet-сегменты, тогда параметр VLAN можно не рассматривать.

В общем случае MAC-адреса непосредственно не зависят от IP-адресов и определяются производителями сетевых карт. С другой стороны, технически относительно несложно изменить MAC-адрес на любой другой произвольный адрес.

IP-адреса определяются оператором городской сети и могут выдаваться либо автоматически (например по протоколу DHCP), либо за каждым подключенным абонентом закрепляется фиксированный IP-адрес. Тем не менее, как и в случае MAC-адреса, абоненты способны изменить свои IP-адреса на любой из IP-подсети их VLAN-а, в том числе и, например, IP-адрес шлюза, маршрутизирующего трафик между VLAN-ами.

То, что пользователь изменить не может, это свой VLAN и соответствующую ему IP-подсеть.

Из сказанного очевидно, что идентифицировать абонента только по его IP- и/или MAC-адресам хоть и технически легко реализуемо, но очень недальновидно.

Существует несколько технологий идентификации абонентов. Наиболее гибкая и безопасная, когда каждый абонент подключен к закрепленному за ним отдельному порту на управляемом («умном») коммутаторе. В таком случае на порту можно жестко указать разрешенные абоненту MAC- и IP-адреса (если абонент изменит свои реквизиты, управляемый коммутатор его в сеть не выпустит) или же настроить так называемую аутентификацию по порту (протокол 802.1X). Аутентификация по порту осуществляется по протоколу Radius, и абонент идентифицируется под индивидуальными логином (именем пользователя) и паролем. При этом контролировать адреса абонентов уже не требуется, так как в любой момент известно, кто на каком порту работает. Минус этой технологии связан со значительными материальными затратами, так как «умные» коммутаторы стоят недешево, а требуется их много (например, если коммутатор имеет 24 порта, то требуется по одному коммутатору примерно на 20 абонентов, а в городских се-

тях обычно тысячи или даже десятки тысяч абонентов), так что полноценное ее использование могут себе позволить лишь очень крупные операторы. Обычно же на «умных» коммутаторах строят магистральные сети, а абонентов подключают к дешевым неуправляемым коммутаторам.

Вторая технология – использование «виртуальных частных сетей» – VPN (в статье рассматриваются протоколы PPPoE и PPTP). В этом случае абонент идентифицируется не по его сетевым реквизитам, а по индивидуальному логину и паролю. Абонент подключается к виртуальной сети, получает еще один связанный с его логином IP-адрес и выходит в сеть уже под ним. Эта технология схожа с технологией авторизации по порту по протоколу 802.1X. Различия в том, что абоненту разрешается доступ к локальной сети без авторизации, а также в том, что после авторизации фактически весь трафик «заворачивается» в туннель VPN.

Преимущество VPN-а в том, что весь трафик абонента можно зашифровать, что воспрепятствует «подслушиванию» этого трафика третьими лицами. Недостатки – терминирующее VPN оборудование стоит недешево (обычно применяются программно-аппаратные маршрутизаторы, например фирмы Cisco) и обычно его возможностей хватает лишь на маршрутизацию Internet-трафика, внутрисетевой (локальный) же трафик приходится пускать напрямую, мимо VPN. Также существует опасность перехвата логина и пароля третьими лицами и, соответственно, несанкционированного доступа в сеть.

Поэтому использование VPN не освобождает от необходимости аудита сетевых адресов абонентов.

Целесообразно создание многоуровневой системы аудита использования сетевых адресов. На верхнем уровне – привязка сетевых реквизитов к логину абонента (логирование входов в VPN с сохранением адреса, из-под которого абонент пытался войти в VPN). На втором уровне – привязка MAC-адреса к IP-адресу, эту информацию можно снимать, например с ARP-кеша маршрутизаторов. И на третьем уровне – привязка MAC-адресов к портам «умных» коммутаторов.



Привязка логина абонента к его сетевым реквизитам осуществляется по логам Radius-сервера, осуществляющего аутентификацию абонентов для VPN-серверов. В результате получается таблица, состоящая из столбцов: временные метки входа и выхода абонентов в сеть VPN, их (абонентов) логины и сетевые реквизиты точки подключения, с которых были осуществлены входы в сеть VPN. Сетевые реквизиты зависят от использованного протокола VPN – для PPTP это будет IP-адрес точки подключения, для PPPoE это VLAN и MAC-адрес.

Очевидно, что при использовании протокола PPTP необходимо также отслеживать сопоставления IP-адреса точек подключения с их MAC-адресами. В простейшем случае можно снимать таблицу ARP-кеша с маршрутизаторов и отслеживать изменения этой таблицы (появления/пропадания точек подключения). В результате строится таблица изменения сетевых реквизитов абонентами, состоящая из столбцов: временные метки изменения реквизитов (либо первого «появления» реквизитов в сети) и непосредственно реквизитов (VLAN-а, MAC-а и IP-адреса). Однако стоит учесть, что в отличие от таблицы привязки VPN-логинов к реквизитам, эту таблицу нельзя считать полностью актуальной, так как существует множество методов «отравить» ARP-кеш (атака arp-poison) и заполнить эту таблицу неактуальными данными.

На нижнем уровне системы аудита осуществляется привязка сетевых реквизитов к физическим точкам подключения (и соответственно к конкретным людям, отвечающим за эти точки подключения). Информацию эту можно снять с управляемых коммутаторов. Точность такой привязки будет зависеть от того, насколько «близко» расположен управляемый коммутатор к конечной точке подключения. Очевидно, что абсолютную точность можно получить лишь при схеме, когда каждый абонент подключен к индивидуальному порту на управляемом коммутаторе. Другой пример, когда на один дом ставится один управляемый коммутатор и каждый подъезд этого дома подключается к его порту. Тогда точность определения физи-

ческого подключения будет до одного подъезда. В большинстве случаев это приемлемо.

Каждый управляемый коммутатор хранит таблицу сопоставления MAC-адресов (а также и VLAN-ов) и своих портов. Эту таблицу можно снимать с коммутаторов по протоколу SNMP. В результате получается таблица, состоящая из столбцов: IP-адресов управляемого коммутатора, временных меток проявления и исчезновения реквизитов, VLAN-ов и MAC-адресов точек подключения (абонентов) и портов, с которых эти реквизиты проявлялись. Так как IP-адреса управляемых коммутаторов определяются оператором, то несложно связать их с адресами физического расположения этих коммутаторов (улица/дом/подъезд...).

В результате по этим таблицам несложно построить отчеты сопоставления входов в VPN и физических точек подключения.

Остается проблема отслеживания так называемых «самоподключенных» абонентов, неавторизованно подключенных к городской сети без ведома оператора. В VPN-сеть такие абоненты войти не могут, так как не имеют своих логинов и паролей, но локальная сеть для них открыта. В общем случае эту проблему решить можно только при схеме «один абонент – один порт на управляемом коммутаторе».

В связи с этим предлагается компромиссная технология, позволяющая ограничивать доступ к локальной сети лишь авторизованным через VPN абонентам.

#### **Технология ограничения доступа абонентов к локальной сети посредством авторизации через VPN**

Исходные требования:

- для доступа абонентов в сеть Internet используется VPN по протоколам PPTP и/или PPPoE;

- количество точек подключения в одном VLAN-е минимально (например один VLAN на один дом или подъезд);

- весь локальный трафик маршрутизируется одним или несколькими «центральными маршрутизаторами», программными либо аппаратно-программными (если марш-

рутизаторов несколько, они подключаются в кластер для распределения нагрузки);

– все IP-подсети, принадлежащие локальной сети (далее локальные IP-подсети), четко определены;

– все абоненты должны прописать на своих точках подключения правила маршрутизации, маршрутизирующие все локальные IP-подсети напрямую на центральный маршрутизатор, минуя VPN.

Технология заключается в том, что абонентам открывается доступ к локальной сети лишь после авторизации через VPN.

Изначально на центральном маршрутизаторе используется политика полного запрета, то есть для всех абонентов маршрутизация для всего локального трафика (в том числе между всеми VLAN-ами) закрыта (например, файрволлом). Когда абонент авторизуется через VPN, биллинговая система передает каким-либо способом реквизиты точки подключения абонента (IP-адрес при использовании VPN-протокола PPTP либо VLAN и MAC-адрес в нем при использовании протокола PPPoE) в список разрешенных реквизитов на центральный маршрутизатор. В результате авторизованный абонент выходит в сеть Internet через VPN, а в локальную сеть выходит через центральный маршрутизатор. Как только абонент завершает свою VPN-сессию, биллинговая система удаляет его реквизиты из списка разрешенных реквизитов на центральном маршрутизаторе. Доступ к сети Internet, равно как и к локальной сети (но не в пределах VLAN-а абонента!), абоненту запрещается.

Преимущество этой технологии заключается в существенной экономии средств на закупку дорогостоящего оборудования, такого как управляемые коммутаторы или терминирующие VPN маршрутизаторы, способные пропустить через себя не только сравнительно небольшой поток Internet-трафика, но и практически неограниченный локальный трафик.

### Заключение

В настоящей статье было рассмотрено несколько различных технологий иден-

тификации абонентов в городских сетях, их достоинства и недостатки. Предложена оригинальная технология идентификации абонентов в городских сетях, основанная на технологии Ethernet, позволяющая существенно сэкономить на финансовых вложениях. Эта технология успешно внедрена и проходит апробацию в одном из городских провайдеров.

### Библиографический список

1. Невдяев Л. М. Телекоммуникационные технологии. Англо-русский толковый словарь-справочник Серия изданий «Связь и бизнес», – М.: МЦНТИ – Международный Центр научной и технической информации, ООО «Мобильные коммуникации», 2002. – 592 с
2. D. McPherson, B. Dykes RFC3069 – VLAN Aggregation for Efficient IP Address Allocation Network Working Group, Amber Networks, Inc., Onesecure, Inc., 2001. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3069.html>
3. K. Hamzeh, G. Pall, W. Verthein, J. Taarud, W. Little, G. Zorn RFC2637 – Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP) Network Working Group, Ascend Communications, Microsoft Corporation, 3Com, Copper Mountain Networks, ECI Telematics, Microsoft Corporation, 1999. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2637.html>
4. L. Mamakos, J. Evarts, D. Carrel, D. Simone, R. Wheeler RFC2516 – A Method for Transmitting PPP Over Ethernet (PPPoE) Network Working Group, K. Lidl, UUNET Technologies, Inc., RedBack Networks, Inc., RouterWare, Inc., 1999. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2516.html>
5. P. Congdon, B. Aboba, A. Smith, G. Zorn, J. Roese RFC3580 – IEEE 802.1X Remote Authentication Dial In User Service Network Working Group, Hewlett Packard Company, Microsoft, Trapeze Networks, Cisco Systems, Enterasys, 2003. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3580.html>
6. David C. Plummer RFC826 – Ethernet Address Resolution Protocol Network Working Group, Symbolics, Inc., 1982. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc826.html>
7. J. Case, M. Fedor, M. Schoffstall, J. Davin RFC1157 – Simple Network Management Protocol (SNMP) Network Working Group, SNMP Research, Performance Systems International, MIT Laboratory for Computer Science, 1990. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc1157.html>
8. C. Rigney, A. Rubens, W. Simpson, S. Willens RFC2138 – Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS) Network Working Group, Livingston, Merit, Daydreamer, 1997. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2138.html>

## МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ И СЖАТИЯ ИНТЕРАКТИВНОГО ВИДЕО В ВИДЕОПОТОКЕ: МЕТОД МАСОК И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ

А.С. ВОЛКОВ, *асп. каф. вычислительной техники МГУЛ*

*vxsin@rambler.ru*

В процессе развития видеотехнологий возникают сложные проблемы технологического характера. Одной из проблем в области мультимедиа-технологий является организация и хранение данных в интерактивном видео. Для решения этой проблемы необходимо решить ряд задач:

- обеспечение сжатия видео, не выходя за рамки стандартов *MPEG4*;
- независимость кадров друг от друга
- каждый кадр должен нести полную информацию о себе для организации видеопотока;
- организация дополнительной информации, обеспечивающей интерактивность видео;
- сжатие дополнительной информации. Обеспечить при этом скорость декомпрессии без потери качества.

В работе решается задача организации дополнительной информации, обеспечивающей интерактивность видео с помощью метода масок и пользовательских данных.

Обычно видео представляет собой фильмы, содержит кадры. Кадры – это сжатые изображения. Каждый кадр имеет заголовок определенного формата и типа.

Интерактивное видео дополняется управляющей информацией, управление реализуется путем отображения пользователю не только самого изображения, но и информации об объектах на нем, а также программные средства взаимодействия с этими объектами. В видеоданные включают дополнительную информацию о каждом кадре: имеющиеся объекты, их границы, описание объектов, их назначение и другая информация.

В настоящей работе предложен и испытан новый метод масок. Метод заключается в следующем. Объекты оформляются в виде черно-белой маски (альфа-маска). Такая маска сжимается для каждого кадра (в рамках стандарта *MPEG4 Visual*). Один кадр с альфа-маской может содержать несколько выделен-

ных границей объектов. На рис 1 а показан один кадр исходного видео, а на рис 1 б показана альфа-маска того же кадра.

Маска определяет границы объектов. По границам можно отслеживать движение манипулятора (мышь или другое устройство).

Информация о маске имеет структуру, содержащую название объекта, описание, границы, вид действия. Такая структура может расширяться по мере развития функциональности. На рис. 2 представлена часть заголовка кадра (в стандарте *MPEG4 Visual*) для потока данных типа *ES – elementary stream*.

Этот заголовок дает возможность записать любую последовательность данных, отличную от последовательности из 23 нулей и одной единицы. Эта последовательность оповещает о конце пользовательских (не видео) данных.

Для обозначения контуров объектов используется информационная альфа-маска для каждого макроблока (части изображения) и передается код *bab\_type* (специальный код). Этот код сигнализирует о том, является ли данный макроблок прозрачным (т.е. он не входит в картинку, и значит его не надо кодировать), непрозрачным (он является внутренним для картинки, поэтому движение и текстура кодируется по обычной схеме) или граничной (часть его прозрачна, а часть – нет).

Бинарная альфа-маска (*BAB – Binary Alpha Block*) каждого граничного макроблока кодируется с помощью контекстно зависимого арифметического кодера (*CAE – Context Arithmetic Encoder*). Математически арифметическое кодирование выглядит следующим образом. Пусть  $N$  – количество символов алфавита,  $p_i$  – вероятность появления в последовательности данных символа с порядковым номером  $i$ . Тогда  $i$ -му символу ставится в соответствие интервал

$$\left[ \sum_{k=0}^{i-1} p_k, \sum_{k=0}^i p_k \right), i = 1..N, p_0 = 0.$$



а



б

Рис 1. Дополнительная информация о кадре в интерактивном видео: а) – исходный кадр; б) альфа-маска

user_data() {	No. of bits
user_data_start_code	32
while( next_bits() != '0000 0000 0000 0000 0000 0001' ) {	
user_data	8
}	
}	

Рис. 2. Часть заголовка кадра ES



Вероятности появления символа находятся в диапазоне  $[0,1)$ . Каждый поступающий на обработку символ уменьшает этот интервал пропорционально вероятности своего появления. Этот метод сжатия позволяет довольно эффективно сжимать альфа-маски, так как они черно-белые. Контекстно зависимое арифметическое кодирование отличается от классического тем, что имеются шаблоны ранее закодированных символов, и относительно этих шаблонов, вычисляется контекст следующих пикселей. Пусть число  $P(0)$  – вероятность того, что пиксель  $X$  равен 0 при условии данного контекста. Тогда каждый пиксель новой маски кодируется следующими шагами:

1. Вычисляется контекст  $X$ .
2. Осуществляется поиск  $P(0)$  в таблице вероятностей.
3. Пиксель  $X$  кодируется арифметическим кодером. Полученный в результате вычисления интервал совпадает с  $[0, P(0)]$ , если  $X = 0$  (черный), и он равен  $[P(0), 1]$ , если  $X = 1$  (белый).

Сжатие альфа-масок по алгоритму *CAE* максимально эффективно по отношению к другим методам кодирования.

Заголовок кадра содержит дополнительную информацию в виде текста формата *ANSIUNICODE*. Это ссылки на различные кадры, другие видеопотоки, имена объектов на сцене и другая интерактивная информация.

Схема организации интерактивной информации может выглядеть следующим образом.

Объект:

<Имя> <Описание> <Ссылка на кадр> <номер кадра> <Координаты ключевой точки>

А в файле может находиться в таком виде:

[*Object*: <*Polygon*> <*First Polygon*>  
<*Frame link*> <255> <10,10,40,60>][...][...]

Такую информацию по требованию можно сжать RAR-подобным алгоритмом, ориентированным на сжатие текстов и другой статичной информации. Получаемые на выходе кадры, содержащие сжатое изображение с масками и данными о них, будут поддерживать интерактивность при воспроизведении видео. В предлагаемой схеме кодирования интерактивных данных обеспечивается совместимость со стандартом *MPEG4 Visual*.

Первые испытания метода организации данных показали хорошие результаты в хранении сжатой полезной информации об объектах на сцене. Также были выявлены сильные стороны интерактивного видео, что позволило сделать выводы о его значимости в сфере теле- видеовещания и взаимодействия с видео через Интернет.

#### Библиографический список

1. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006 – 1072 с.
2. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения / Я. Ричардсон. – М.: Техносфера, 2005 – 368 с.
3. Information technology — Coding of audio-visual objects — Part 2: Visual. / ISO/IEC 14496-2 Second edition 2001-12-01 – 536 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

А.Н. ДМИТРИЕВ, доц. каф. систем автоматического управления САУ МГУЛ, канд. техн. наук

*alexmitriev007@yandex.ru*

**А**нализ решаемых задач, принципов построения и условий функционирования сети информационного обмена (СИО) между распределенными объектами позволяет сделать вывод о том, что она представляет

собой сложную функционально интегрированную систему и ее исследование необходимо проводить на основе теории анализа и синтеза сложных систем. Эффективность такой системы может быть представлена

сложной функцией, аргументами которой являются:

– показатель качества решения функциональных задач, характеризующий способность сети обеспечить информационный обмен в интересах обеспечения выполнения общей функциональной задачи группой распределенных объектов

$$E_{\text{КС}} = \varphi\{e_{C1}, e_{C2}, \dots, e_{Cn}\}; \quad (1)$$

– различные виды затрат ресурсов сети  $E_{\text{ЗР}}$  (частотного, энергетического, временно-го, аппаратурного, канального и др.)

$$E_{\text{ЗР}} = \varphi\{e_{P1}, e_{P2}, \dots, e_{Pm}\}. \quad (2)$$

В этом случае обобщенная функция эффективности ИС будет иметь вид

$$E_{\text{ИС}}(t) = \varphi\{E_{\text{КС}}(t), E_{\text{ЗР}}(t)\}. \quad (3)$$

Требования по представленным показателям носят взаимосвязанный и порой противоречивый характер. Изменение количественной меры одного из них, как правило, приводит к изменению остальных. Критерием оптимальности СИО в идеале может быть получение экстремума для всех перечисленных показателей. Этот подход к оптимизации СИО предполагает либо свертку нескольких показателей эффективности в один интегральный показатель, либо решение многокритериальной оптимизационной задачи. В том и в другом случае результат оптимизации зависит от вида свертки, коэффициентов важности частных показателей, методов решения многокритериальной задачи. Попытки формализации и строгого математического описания связей между показателями приводят к необходимости проведения экспертных опросов и эвристическим алгоритмам, что увеличивает субъективность получаемых оценок.

Одним из общепринятых подходов к решению полученной многокритериальной оптимизационной задачи является выбор основного показателя и перевод остальных в ранг ограничений.

Принимая во внимание, что основным предназначением СИО является обеспечение информационного обмена в интересах решения функциональных задач связи при заданном ресурсе, в качестве основных выбирают показатели, характеризующие функциональную эффективность  $E_{\text{КС}}$ .

Показателями качества решения функциональных задач  $E_{\text{КС}}$  являются вероятностно-временные характеристики пребывания сообщений в сети, которые определяются функцией распределения времени пребывания сообщений в СИО. В качестве таких показателей выступают вероятности своевременного доведения сообщений с потерями достоверности не более допустимых в интересах решения задач связи  $E_{\text{КС}}$ .

Особенностью построения СИО является то, что она может быть реализована различными типами сетевых протоколов доступа абонентов, каждый из которых в различных условиях требует разных затрат ресурсов. Кроме того, выполнение требований к ВВХ доведения сообщений определяется минимально необходимыми затратами ресурсов для данной информационной сети и заданных условий функционирования. Поэтому минимизация затрат ресурсов при выполнении требований к показателям качества решения функциональных задач (ВВХ доведения сообщений) позволяет эффективно использовать имеющийся ресурс и обеспечивает требуемое качество информационного обмена в условиях сложной помеховой обстановки.

В качестве показателей качества *информационной сети*  $E_{\text{КС}}$  выбирают:

– вероятность обеспечения связи с потерями достоверности не более допустимых (вероятность связи в канале)

$$p_{\text{св}} = p(D \leq D_{\text{доп}}) = p(h \leq h^*),$$

где  $h^*$  – максимально допустимое отношение помеха-сигнал, при котором выполняются требования по достоверности;

– отношение помеха-сигнал на входе приемника  $h$ ;

– потери достоверности связи, определяемые вероятностью ошибки приема символа  $D = P_{\text{М}}$ .

В качестве обобщенной меры измерения затрат ресурсов выбирают  $R_{\text{ИС}}$ .

Приведенный выбор показателей эффективности СИО основан на общепринятом подходе к решению задачи анализа и синтеза сложных систем. Данный подход предусматривает, во-первых, декомпозицию сложной системы на основные структурно-функциональные элементы, во-вторых, формирование

обобщенного показателя, характеризующего степень выполнения системой основных функций в соответствии с целевым предназначением. Структура разрабатываемых моделей также должна отражать структуру объекта исследования, позволяя последовательно, на каждом выделенном уровне, оценивать качество протекающих процессов. При этом вид и параметры модели информационной сети определяются используемым алгоритмом сетевого доступа.

Следует отметить возможность применения традиционных аналитических методов моделирования, использующих уравнение передачи как основу энергетического расчета радиоприемника при оценке результирующего отношения «помеха-сигнал» на входе приемника в условиях воздействия преднамеренных помех.

Для исследования сложных систем с обратной связью в радиотехнике нашли достаточно широкое применение сигнальные или потоковые графы, методы анализа которых впервые были разработаны С. Мэзоном. При этом теория потоковых графов применима к описанию и исследованию стохастических сетей, моделирующих временные процессы (Т – процессы). Передача сообщений по дискретным каналам радиосвязи в ИС, безусловно, является Т-процессом и в целом подчиняется законам функционирования стохастических сетей. Одним из методов, используемых при анализе и синтезе информационных сетей, представляемых стохастическими сетями, является метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). В основу метода ТПСС положена замена множества элементарных ветвей одной эквивалентной. Причем каждая ветвь стохастической сети характеризуется вероятностью того, что данная ветвь будет выбрана при условии реализации вершины, из которой она исходит, и преобразованием Лапласа–Стилтьеса (ПЛС) интегральной функции распределения (ИФР) времени, необходимого для реализации процесса, изображаемого данной ветвью. Выбор ПЛС объясняется тем, что ему, в отличие от других преобразований, может быть придан четкий физический смысл вероятности того, что за время совершения процесса не про-

изойдет «катастроф», интенсивность потока которых

$$s = 1/T_{ст}$$

где  $T_{ст}$  – среднее время старения информации, передаваемой в сети информационного обмена.

Метод ТПСС позволяет с учетом топологии сети и характеристик ветвей получить эквивалентную  $Q$ -функцию стохастической сети, знание которой, в свою очередь, позволяет определить ИФР времени  $T_{преб}$  пребывания сообщения в информационной сети, которое является суммой  $n$  независимых случайных величин, т.е.

$$T_{преб} = \sum_{i=1}^n T_i$$

В соответствии с данным подходом функция распределения суммы  $n$  независимых случайных величин

$$F(\sum_{i=1}^n T_i) = F(T_{преб}),$$

определяется сверткой Лапласа–Стилтьеса функций  $F_i(T_i)$

$$F_{T_{преб}}^*(T_{преб}^*) = \{ \{ \{ \{ F_1(T_1) \cdot F_2(T_2) \} \cdot F_3(T_3) \} \dots \dots \cdot F_i(T_i) \} \dots \cdot F_n(T_n) \} \}, \quad (4)$$

где \* – знак стилтьесовской свертки.

При этом, согласно мультипликативному свойству ПЛС, свертке на множестве оригиналов (4) соответствует обычное произведение на множестве изображений (5)

$$Q_{преб}(s) = h_1(s) \cdot h_2(s) \cdot h_3(s) \dots h_i(s) \dots h_n(s). \quad (5)$$

Для получения результирующего выражения и определения ИФР времени пребывания (доведения) сообщения в информационной сети достаточно применить обратное ПЛС от эквивалентной функции  $Q_{преб}(s)$ .

Функционирование сетей информационного обмена, использующих различные алгоритмы многостанционного доступа, кроме того описывается различными видами систем массового обслуживания, моделирование которых возможно как аналитическими, так и имитационными методами. Причем, именно сопоставление результатов моделирования, полученных аналитическими и имитационными методами, позволит делать выводы об адекватности разрабатываемых моделей.

Таким образом, описанные выше методы исследования и моделирования, предполагающие структурно-функциональную деком-

позицию информационной сети на элементы, позволят достаточно детально проанализировать и учесть влияние каждого элемента на вероятностно-временные характеристики доведения сообщений в реальных условиях обстановки.

### **Структурно-декомпозиционное представление математических моделей и показателей эффективности сети информационного обмена**

В основе идеологии построения любой современной информационной системы (ИС), как правило, используется эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), определенная стандартами международной организации по стандартизации (МОС). Такой подход основан на доминирующей в настоящее время тенденции интеграции территориально и функционально разобщенных систем в единую глобальную функционально-ориентированную систему, основанную на использовании единого информационного пространства [1]. Причем формальные требования, предъявляемые к технологии разработки таких систем, не ограничивают их внутреннюю структуру, открывая при этом новые возможности по совершенствованию (унификации) процессов обмена сообщениями и технологий обработки данных.

С функциональной точки зрения эталонная модель предусматривает взаимодействие систем (сетей) не непосредственно друг с другом, а через некоторое функциональное пространство, в котором выполняются определенные и единые для всех систем (сетей) правила.

ЭМВОС, в своем классическом представлении, предполагает выделение 7 логических уровней передачи и обработки информации: физического, канального, сетевого, транспортного, сеансового, представительного и прикладного.

При этом наиболее важными с точки зрения оценки показателей качества решения функциональных задач являются четыре уровня: физический (сигнальный), канальный, сетевой и транспортный, остальные уровни (сеансовый, представительный, прикладной) выполняют функции управления ИС, опреде-

ления форматов данных собственных сообщений, порядка их передачи, приема и обработки, обеспечение решения прикладных задач.

Особенностью нулевого уровня как транспортной среды является то, что через него осуществляется воздействие на сеть наиболее характерного для рассматриваемого диапазона комплекса дестабилизирующих факторов (непреднамеренных и преднамеренных помех), объединенных понятием «система помеховых воздействий» (СПВ).

В соответствии с принципами ЭМВОС взаимодействие между логическими объектами одинаковых уровней осуществляется с помощью особых правил – протоколов, между смежными уровнями – с помощью специальных устройств, образующих интерфейс.

Декомпозиция СИО в соответствии с логическими уровнями ЭМВОС, основанная на реализации принципов нисходящего проектирования, позволяет представить модель СИО в виде совокупности структурных элементов, с определенной степенью детализации повторяющих архитектуру объекта исследования.

Многоуровневое представление СИО с позиций ЭМВОС позволяет сформировать обобщенную математическую модель объекта исследования в виде совокупности взаимосвязанных математических моделей, описывающих систему на каждом из иерархических уровней. В соответствии с принятой в системном подходе последовательностью разработки математических моделей сложных систем одним из основных этапов, выполняемых на стадии макропроектирования, является выбор показателей эффективности на каждом из уровней модели, на основе которых в дальнейшем анализируется эффективность функционирования системы. Используемые показатели должны количественно отображать степень выполнения ИС основных функций на каждом уровне, обеспечивающих достижение поставленных целей в соответствии с основным предназначением. Структура обобщенного показателя должна отражать многоуровневое представление модели системы при условии, что показатели нижнего уровня выступают в качестве соответствующих исходных параметров в математических моделях верхнего уровня декомпозиции.



Декомпозиция моделей и показателей эффективности по уровням иерархии

Уровень модели СИО	Математические модели СИО	Математические схемы СИО	Показатели эффективности
Физический	Модели сигналов и помех в каналах радиосвязи ИС. Уравнения радиопередачи	Стохастические дифференциальные и конечно-разностные уравнения	Отношение помеха/сигнал $h$ . Потери достоверности радиосвязи $D$ (вероятность ошибки приема символа $p_m = \varphi(h)$ ).
Канальный	Модели состояний каналов радиосвязи в ИС	Случайный импульсный поток с длительностями импульсов $\tau_{пр}$ и скважностью $\tau_{непр}$ . Имитационные модели	Вероятность радиосвязи с потерей достоверности не более допустимой $P_{св} = P(D \leq D_{доп}) = P(h \leq h^*)$ . Плотность распределения длительностей пригодного и непригодного состояния радиоканала $\omega_{пр}(\tau), \omega_{непр}(\tau)$ . Математические ожидания длительностей пригодного и непригодного состояния радиоканала $M[\tau_{пр}], M[\tau_{непр}]$
Сетевой	Модели информационных сетей	Системы массового обслуживания $M_j / G_j / N$ , Многофазные СМО Имитационные модели	ВВХ процессов пребывания сообщений в информационных сетях $F_{преб ИС}(t) = P[t \leq T_{тр} / D \leq D_{доп}]$
Транспортный	Модель СИО	Совокупность систем массового обслуживания $M_j / G_j / N$ , однофазных (многофазных), приоритетных	$E_{\Sigma_{св}} = \sum_{s=1}^{N_{св}} \alpha_{впр s} P[t \leq T_{доп} / D \leq D]$

Анализ требований к показателям эффективности, основанный на многоуровневом представлении модели СИО, позволяет сделать вывод о том, что представленная в пункте 4.1 система показателей полностью отражает взаимосвязь показателей физического, канального, сетевого уровня и транспортного уровня с обобщенным показателем эффективности.

Структурно-декомпозиционное представление математических моделей СИО и выбранных показателей эффективности на различных иерархических уровнях представлено в таблице

Анализ данных таблицы показывает, что каждому уровню СИО соответствуют конкретные математические модели и показатели эффективности.

Последовательная оценка характеристик качества информационного обмена, основанная на реализации представленной иерархии математических моделей, позволит оценить эффективность ИС по обобщенному

показателю, включающему показатели эффективности всех выделенных уровней декомпозиции.

Основными математическими моделями физического уровня сети, обеспечивающего передачу электрических сигналов через среду распространения радиоволн, являются модели сигналов и помех, а также уравнения передачи, составляющие основу энергетического расчета радиоканалов.

Учитывая, что передача информации в сетях обмена данными осуществляется посредством дискретных радиосигналов, в качестве показателя эффективности на физическом уровне декомпозиции модели информационной сети выберем вероятность ошибки приема символа  $p_m$  (без применения методов кодирования), однозначно определяющую потери достоверности. Причем совершенно очевидно, что значение данного показателя для конкретного вида сигнала определяется отношением помеха-сигнал на входе приемника  $h$ .

Показатель эффективности  $p_m$  в свою очередь используется в качестве исходной переменной в математических моделях второго (канального) уровня модели. При этом основными математическими моделями канального уровня СИО являются модели состояния радиоканалов, а показателями эффективности – вероятность радиосвязи с потерей достоверности не более допустимой  $P_{cb} = P(D \leq D_{доп}) = P(h \leq h^*)$ ; плотность вероятности длительностей пригодного (непригодного) для передачи информации с заданной достоверностью состояний радиоканала и их параметры. Данные показатели эффективности являются исходными переменными математических моделей сетевого уровня.

Основными показателями эффективности сетевого уровня модели являются вероятностно-временные характеристики (ВВХ) процессов пребывания сообщений в сетях связи, определяемые функциями распределения (ФР) времени пребывания сообщений в сетях, при фиксированном значении вероятности выполнения требований по достоверности.

Принимая во внимание, что СИО на заданном уровне управления представляет собой совокупность информационных сетей связи и основным предназначением системы является обеспечение информационного обмена в интересах решения функциональных задач, в качестве показателей эффективности на транспортном уровне определим показатели качества решения задач связи  $E_{\Sigma_{cb}}$ , определяемые на основе ВВХ доведения сообщений в соответствующих сетях на сетевом уровне, соотнесенные с затратами ресурса. Тогда обобщенный показатель СИО представляет собой свертку показателей качества решения задач и определяется из выражения

$$E_{ис} = \sum_{f=1}^{N_f} \alpha_f E_{\Sigma_{cb} f}, \quad (6)$$

где  $\alpha_f$  – коэффициент важности функциональных задач.

Таким образом, обобщенный показатель эффективности функционирования СИО в виде выражения (6) представляет собой композицию показателей всех выделенных уровней ЭМВОС.

Представление СИО с позиций ЭМВОС, а также использование принципов

структурно-функциональной декомпозиции при создании моделей системы и выборе показателей ее эффективности существенно упрощает задачу анализа и оценки эффективности сетей информационного обмена.

### **Повышение эффективности сети информационного обмена на основе применения методов искусственного интеллекта при реализации функций управления сетью**

Особенностью СИО является то, что она может быть смоделирована и реализована с использованием различных типов сетевых протоколов доступа абонентов, каждый из которых в тех или иных условиях требует разных затрат ресурсов. Кроме того, выполнение требований к ВВХ доведения сообщений определяется минимально необходимыми затратами ресурсов для данной информационной сети и заданных условий функционирования. Поэтому минимизация затрат ресурсов при выполнении требований к показателям качества решения функциональных задач (ВВХ доведения сообщений) позволяет эффективно использовать имеющийся ресурс и обеспечивает требуемое качество информационного обмена в условиях сложной помеховой обстановки.

Во многих случаях достижение требуемых показателей качества сети информационного обмена может быть достигнуто на основе реализации адаптивных алгоритмов формирования управляющих сигналов приоритетного обслуживания и перераспределения ресурсов сети. Структура сети информационного обмена с устройством реализации адаптивного алгоритма формирования управляющих сигналов приоритетного обслуживания и перераспределения ресурса сети приведена на рисунке.

Адаптивный алгоритм управления процессом использования ресурса сети информационного обмена обеспечивает выбор того или иного сетевого протокола в зависимости от характера решаемой задачи, реализацию приоритетного обслуживания сообщений, перераспределение канального и сетевого ресурса в интересах той или иной информационной задачи и т.д.

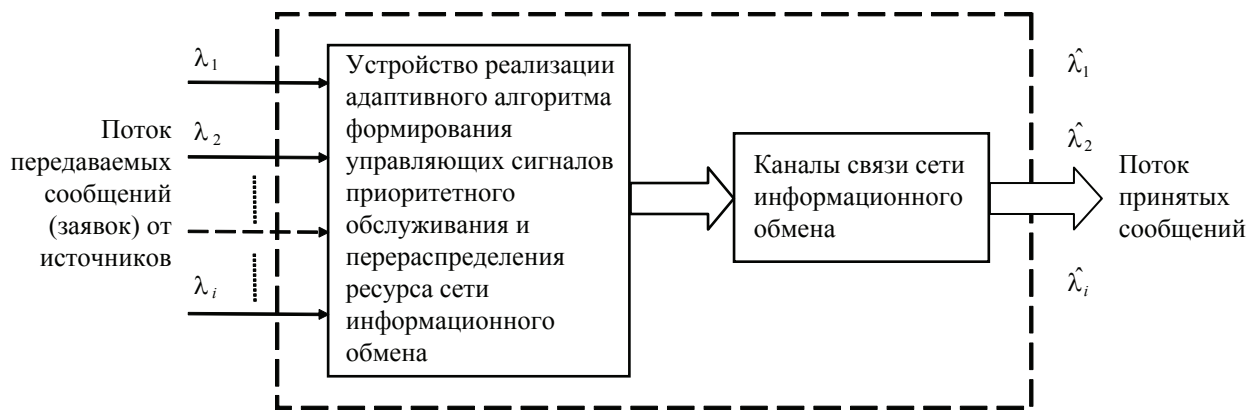


Рисунок. Структура сети информационного обмена с устройством реализации адаптивного алгоритма формирования управляющих сигналов приоритетного обслуживания и перераспределения ресурса сети

Принятие решений в таком алгоритме представляет собой сложную задачу, решение которой невозможно без привлечения методов искусственного интеллекта.

В исследованиях по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление, получившее название «экспертные системы» [2]. Экспертные системы и системы искусственного интеллекта отличаются от систем обработки данных тем, что в них в основном используются символьный (а не числовой) способ представления, символьный вывод и эвристический поиск решения (а не исполнение известного алгоритма).

В настоящее время широкое распространение в мире получила экспертная система реального времени под названием G2 (фирмы Gensym, США). G2 – это объектно ориентированная интегрированная среда для разработки и сопровождения приложений реального времени, использующих базы знаний.

Основным достоинством оболочки экспертных систем G2 является возможность применять ее как интегрирующий компонент, позволяющий за счет открытости интерфейсов и поддержки широкого спектра вычислительных платформ легко объединить уже существующие, разрозненные средства автоматизации в единую систему управления. Это достоинство позволяет использовать экспертную систему реального времени G2 для реализации алгоритмов адаптивного управления процессом использования ресурса сети информационного обмена распределенных объектов АСУ.

#### Библиографический список

1. Уозлрд, Дж. Телекоммуникационные и компьютерные сети. Вводный курс / Дж. Уозлрд. – М.: Постмаркет, 2001. – 480 с.
2. Джаратано, Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирования. – 4-е издание.: пер. с англ. / Дж. Джаратано, Гари Райли. – М.: «ООО И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.

### О КОЛЕБЛЕМОСТИ ФУНКЦИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ

А.И. РУБИНШТЕЙН, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, д-р физ.-мат. наук*

*cafvm@mgul.ac.ru*

Пусть задано конечное множество из  $2^N$  точек. Элементы  $x$  этого множества можно отождествить с множеством всех наборов длины из нулей и единиц, то есть считать

$$x = (\alpha_1, \dots, \alpha_N),$$

где  $\alpha \in \{0;1\}$ .

Также множеству  $\{x\}$  взаимно однозначно соответствует множество чисел промежутка  $[0;1)$ , образующих равномерную сетку

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j 2^{-j}.$$

Как легко видеть, множество

$$\{x = (\alpha_1, \dots, \alpha_N) \mid \alpha_j \in \{0;1\}\}$$

будет абелевой группой  $G$  после введения групповой операции  $\oplus$  по правилу

$$x \oplus y = (\alpha_1, \dots, \alpha_N) \oplus (\beta_1, \dots, \beta_N) = (\gamma_1, \dots, \gamma_N),$$

где

$$\gamma_j = \alpha_j + \beta_j \pmod{2},$$

то есть

$$\gamma_j = \begin{cases} \alpha_j + \beta_j & \text{при } 0 \leq \alpha_j + \beta_j < 2 \\ \alpha_j + \beta_j - 2 & \text{при } \alpha_j + \beta_j \geq 2 \end{cases}$$

Группа  $G$  обладает цепочкой вложенных подгрупп

$$G = U_0 \supset U_1 \supset \dots \supset U_N = \{(0, \dots, 0) = 0\},$$

$$U_j = \{x = (0, \dots, 0, \alpha_{j+1}, \dots, \alpha_N)\}.$$

Если число  $n \in \{0, 1, \dots, 2^N - 1\}$  записано в двоичной системе счисления, то есть

$$n = \sum_{j=1}^N \varepsilon_j 2^{j-1}, \quad \varepsilon_j \in \{0;1\},$$

то можно определить функцию на  $G$ , принимающую значения  $\pm 1$ ,

$$w_n(x) = (-1)^{\sum_{j=1}^N \varepsilon_j \alpha_j}.$$

Очевидно, что  $w_0 = 1, x \in G$ ,

$$w_1(x) = \begin{cases} +1, & x \in U_1 = \{(0, \alpha_2, \dots, \alpha_N)\} \\ -1, & x \in \{(0, \alpha_2, \dots, \alpha_N)\}^c \end{cases}$$

Понятно, что множество  $\{x = (1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)\}$  является смежным классом по подгруппе  $U_1$  в группе  $G$ . Также видно, что

$$r_j(x) = w_{2^{j-1}}(x) = (-1)^{\alpha_j}, \quad x = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$$

и

$$w_n(x) = \prod_{j=1}^N (r_j(x))^{\varepsilon_j}.$$

В множестве чисел  $\{0, 1, \dots, 2^N - 1\}$ , записанных в двоичной системе, также можно ввести операцию  $\oplus$  по формуле

$$n \oplus m = \left( \sum_{j=1}^N \varepsilon_j(n) \cdot 2^{j-1} \right) \oplus$$

$$\left( \sum_{j=1}^N \varepsilon_j(m) \cdot 2^{j-1} \right) = k = \sum_{j=1}^N \varepsilon_j(k) \cdot 2^{j-1},$$

где

$$\varepsilon_j(k) = (\varepsilon_j(n) + \varepsilon_j(m)) \pmod{2}.$$

После этого множество  $\{0, 1, \dots, 2^N - 1\}$  также оказывается абелевой группой. Нетрудно понять, что  $w_{n \oplus m}(x) = w_n(x) \cdot w_m(x)$ .

Так как из определения  $w_n(x)$  следует, что  $w_n(x \oplus y) = w_n(x) \cdot w_n(y)$ , то множество функций

$$W = \{w_n, n \in \{0, 1, \dots, 2^N - 1\}\}$$

есть система понтригинских характеров группы  $G$ .

На группе  $G$  можно ввести аддитивную меру Хаара  $\mu$ , положив

$$\mu(U_j) = 2^{-j}$$

$$\mu(x \oplus U_j) = \mu(U_j), \quad \mu(x) = 2^{-N} \text{ при любом } x \in G.$$

То есть мера  $\mu$  – атомарна.

Если  $f: G \rightarrow R$  – произвольная действительная функция на  $G$ , то естественным образом возникает интеграл Лебега-Хаара

$$\int_G f(x) d\mu = 2^{-N} \cdot \sum_{k=0}^{2^N-1} f(x_k), \quad x_k \leftrightarrow \frac{k}{2^N}$$

Тогда

$$\int_G w_n(x) w_m(x) d\mu = \delta_{nm} = \begin{cases} 1, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases}$$

$$n, m \in \{0, 1, \dots, 2^N - 1\},$$

то есть  $W = \{w_n(x)\}_{n=0}^{2^N-1}$  является ортонормальной системой функций, определенных на  $G$  и принимающих действительные значения.

Для каждой точки  $x \in G$  справедливо равенство

$$f(x) = \sum_{n=0}^{2^N-1} a_n w_n(x), \quad a_n = \int_G f(x) w_n(x) d\mu.$$

Все вышесказанное полностью соответствует ситуации с рядом Фурье-Уолша-Пэли на двоичной группе [1, 2].

Как известно, степень «колеблемости» функции, определенной на числовой оси, характеризуется ее модулем непрерывности, или модулем непрерывности ее старшей производной. И чем более «гладкой» оказывается функция, тем лучше она приближается частичными суммами своего ряда Фурье (по различным ортонормальным системам функций).

В случае дискретной топологии множества определения (на нуль-мерных группах, например, – см. [1]) понятий производной в локальном смысле не существует. Также и в рассматриваемом случае.

Будем характеризовать колеблемость функции  $f(x)$  на  $G$  набором из  $N$  неотрицательных чисел  $\omega_0^{(p)}(f), \dots, \omega_{N-1}^{(p)}(f)$ , где для  $p \in [1; +\infty], j = 0, 1, \dots, N-1$

$$\omega_j^{(p)}(f) = \sup_{h \in U_j} \left( \int_G |f(x \oplus h) - f(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}},$$

$$1 \leq p < +\infty.$$

$$\omega_0^{(\infty)}(f) = \sup_{h \in U_j; x \in G} |f(x \oplus h) - f(x)|,$$

$$p = +\infty.$$



Очевидно, что  $\omega_0^{(p)}(f) \geq \omega_1^{(p)}(f) \geq \dots \geq \omega_{N-1}^{(p)}(f) \geq 0$ .

Аналогично тому, как это было показано в [3], справедлива

**Теорема 1**

Для любого  $p \in [1; +\infty]$  и любого набора чисел найдется функция  $f: G \rightarrow R$  такая, что  $\omega_j^{(p)}(f) = \omega_j, j = 0, 1, \dots, N-1$ . Отметим, что метод доказательства отличен от изложенного в [3].

Пусть

$$f(x) = \sum_{k=1}^N b_k w_{2^{k-1}}(x) = \sum_{k=1}^N b_k r_k(x)$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \sup_{h \in U_{N-1}} \left( \int_G |f(x \oplus h) - f(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \\ & = \sup_{h \in U_{N-1}} \left( \int_G |b_N (r_N(x \oplus h) - r_N(x))|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \\ & = \left( \int_G |b_N (r_N(x \oplus (0, \dots, 0, 1)) - r_N(x))|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = 2|b_N| \end{aligned}$$

и при  $b_N = 1/2\omega_{N-1} \geq 0$  получаем  $\omega_{N-1}^{(p)}(f) = \omega_{N-1}$ .

Рассмотрим величину  $\Omega_{N-2}$ , равную

$$\begin{aligned} & \sup_{h \in U_{N-2}} \left( \sum_{k=1}^{N-1} b_k r_k(x \oplus h) + \frac{1}{2} \omega_{N-1} r_N(x \oplus h) - \right. \\ & \left. - \sum_{k=1}^{N-1} b_k r_k(x) - \frac{1}{2} \omega_{N-1} r_N(x) \right)^p d\mu = \\ & = \sup_{h \in U_{N-2}} \left( b_{N-1} r_{N-1}(x \oplus h) + \frac{1}{2} \omega_{N-1} r_N(x \oplus h) - \right. \\ & \left. - b_{N-1} r_{N-1}(x) - \frac{1}{2} \omega_{N-1} r_N(x) \right)^p d\mu \end{aligned}$$

В силу мартингалльных свойств  $\{r_j(x)\}_{j=1}^N$  получаем

$$\begin{aligned} \Omega_{N-2} = & \sup_{b_{N-1}; \{h=(0, \dots, 0, \alpha_{N-1}, 1)\}} \left( \int_G |b_{N-1} (r_{N-1}(x \oplus \right. \\ & \left. \oplus (0, \dots, 0, \alpha_{N-1}, 1)) - r_{N-1}(x)) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \omega_{N-1} (r_N(x \oplus (0, \dots, \alpha_{N-1}, 1)) - r_N(x))|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \end{aligned}$$

Очевидно, что выражение по знаком  $\sup$  в правой части последнего равенства непрерывно по  $b_{N-1}$ , обращается в  $\omega_{N-1}$

при  $b_{N-1} = 0$  и стремится к  $+\infty$  при  $b_{N-1} \rightarrow \infty$ . Поэтому найдется такое значение  $b_{N-1}$ , что  $\Omega_{N-2} = \omega_{N-2}$ , причем заведомо это происходит при  $h = (0, \dots, 0, 1, 1)$ , так как  $w_{r_{N-1}}(x \oplus (0, \dots, 0, 1)) - r_{N-1}(x) = 0$ .

Очевидная индукция доказывает теорему.

Вместо  $r_k(x) = w_{2^{k-1}}(x)$  можно взять любую одну функцию с номером из  $[2^{k-1}, 2^k)$ . Справедлива и следующая

**Теорема 2**

Для любой функции  $f: G \rightarrow R$

$$\sum_{n=2^j}^{2^{N-1}} |a_n(f)|^2 = \sum_{h=2^j}^{2^{N-1}} \left| \int_G f(x) w_n(x) d\mu \right|^2 \leq \frac{1}{2} (\omega_j^{(2)}(f))^2.$$

Этот результат аналогичен содержащемуся в [4] и [5]. Причем приведенная оценка точна: для  $f(x) = r_N(x)$  имеет место равенство.

Относительно последнего замечания см. [6] и [5].

Оценка в теореме 2 позволяет выяснить, как много первых членов в «Ряде Фурье-Уолша-Пэли» функции  $f: G \rightarrow R$  надо взять, чтобы получить значение  $f(x)$  с требуемой точностью.

**Библиографический список**

1. Агаев, Г.Н. Мультипликативные системы функций и гармонический анализ на нуль-мерных группах / Г.Н. Агаев, Н.Я. Виленкин, Г.М. Джафарли и др. – Баку: Изд. Элм, 1981. – С. 1–180.
2. Голубов, Б.И. Ряды и преобразования Уолша / Б.И. Голубов, А.В. Ефимов, В.А. Скворцов. – М.: Наука, 1987. – С. 1–344.
3. Рубинштейн, А.И. О модулях непрерывности и наилучших приближениях в  $L_p$  функций, представимых лакунарными рядами Уолша / А.И. Рубинштейн // Математика. – 1983. – № 5. – С. 61–68.
4. Стечкин, С.Б. Об абсолютной сходимости рядов Фурье / С.Б. Стечкин // Изв. АН СССР, серия матем. – 1956. – Т. 20. – С. 289–302.
5. Виленкин, Н.Я. Одна теорема С.Б. Стечкина об абсолютной сходимости и ряды по системам характеров нуль-мерных абелевых групп / Н.Я. Виленкин, А.И. Рубинштейн // Изв. вузов. Математика. – 1975. – № 9. – С. 3–9.
6. Черных, Н.И. О неравенстве Джексона в  $L_2$  / Н.И. Черных // Тр. МИАН СССР. – 1967. – Т. 88. – С. 71–74.

## МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙРОСЕТЕЙ КАК ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ АНАЛИЗА УНИВЕРСАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

К.К. РЫБНИКОВ, *проф. каф. высшей математики МГУЛ, канд. физ.-мат. наук*

*kkrybnikov@mail.ru*

Решение системы булевых уравнений (1) представляет значительный практический интерес, так как является универсальной моделью электронных схем, состоящих из  $m$  технических узлов-преобразователей с  $n$  двойными входами и одним двойным выходом.

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_i, \quad (i = 1, 2, \dots, t). \quad (1)$$

Одним из известных подходов к решению системы (1) является так называемый метод разделяющих плоскостей, основанный на идее погружения множества решений системы булевых уравнений в многогранник

$$M(A, b) = \{x \mid Ax \leq b, x \geq 0\},$$

где  $A$  – матрица размера  $m \times n$ ,

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

$Ax \leq b$  – система линейных неравенств

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n \leq b_j, \quad (j = 1, 2, \dots, m),$$

а условие  $x \geq 0$  соответствует системе условий

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0.$$

Способы построения многогранника  $M(A, b)$ , для которого множество решений системы (1) представляет собой подмножество (или само множество) всех  $(0,1)$  – точек  $M(A, b)$ , рассматривались в работах Г.В. Балакина, В.Г. Никонова, Б.А. Головкина (см., например, [1, 2]).

Подобный подход, ставший известным как метод разделяющих плоскостей [1], позволил при анализе множества решений системы (1) использовать результаты теории многогранников и аппарат математического программирования [3], малым числом вершин удалось получить оценки сложности решения систем (1) в виде  $P(n, t)$ . [9].

В то же время в ряде случаев оказывается плодотворной и идея использования «обратного» подхода, то есть рассмотрения

возможности анализа систем линейных псевдобулевых неравенств с помощью рассмотрения булевых функций-резольвент.

Под псевдобулевым неравенством будем понимать неравенство

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j \leq a_0, \quad x_j \in \{0;1\}, \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

### Определение

Минимальным покрытием неравенства (2) называется множество  $C, C \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ , такое, что

$$\sum_{j \in C} |a_j| > a_0 - \sum_{j=1}^n \min(0; a_j), \quad (3)$$

и для любого множества  $C' (C' \subset C)$  свойство (3) не выполняется.

### Определение

Резольвентой неравенства (3) назовем булеву функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , такую, что  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$  тогда и только тогда, если  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – решение неравенства (2).

Пусть  $L$  – множество всех минимальных покрытий (2). Тогда имеет место лемма Хаммера [9]:

### Лемма

Дизъюнктивная форма

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{C \in L} \prod_{j \in C} x_j^{\alpha_j}$$

является резольвентой неравенства (2), где  $\alpha_j \geq 0$  и  $\alpha_j = 0$  при  $a_j < 0$ , примем  $x_j^1 = x_j, x_j^0 = \bar{x}_j$ .

Из леммы Хаммера и формулы включения-исключения следует теорема о числе решений псевдобулевого неравенства (2).

### Теорема

Пусть  $L = \{C_1, C_2, \dots, C_s\}$  – множество минимальных покрытий (2). Тогда это неравенство имеет  $N$  псевдобулевых решений

$$N = 2^n - \sum_{j=1}^s 2^{n-|C_j|} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^s 2^{n-|C_i \cup C_j|} - \dots - \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i=j=k}}^s 2^{n-|C_i \cup C_j \cup C_k|} + \dots + (-1)^s 2^{n-|C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_s|}.$$

Заметим, что для получения оценок числа  $N$  можно использовать небольшое число слагаемых  $b$  (4), взяв  $i = 1, 2$  [3].

Базовыми элементами нейросети являются так называемые формальные нейроны, функциональные возможности которых определяются функцией активации

$$z = f(g) = f\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + a_0\right),$$

где  $z$  – выходной сигнал нейрона;

$f(g)$  – функция выходного блока нейрона;

$a_i$  – постоянный коэффициент – вес  $i$ -го входа;

$x_i$  –  $i$ -й входной сигнал;

$a_0$  – начальное состояние нейрона;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  – номер входа нейрона;

$n$  – число входов [5].

Одним из наиболее часто встречающихся типов функций активации являются простая пороговая, то есть функция  $f(g)$ , имеющая следующий вид

$$f(g) = \begin{cases} b, & \text{если } g < d \\ c, & \text{если } g \geq d \end{cases}$$

где  $b, c$  и  $d$  – некоторые постоянные.

Как правило, выбираются случаи  $b = -1, c = 1$  или  $b = 0, c = 1$ . В этом случае анализ схемы функционирования формального нейрона сводится к анализу структуры множества решения линейных неравенств (полиэдра) вида

$$g < d \text{ или } g \geq d, \quad (5)$$

Другой задачей анализа структуры формального нейрона является задача о настройке нейрона, разделяющего по выходному сигналу два массива  $n$ -мерных векторов. В этом случае решается задача о выборе весовых коэффициентов  $a_0, a_1, \dots, a_n$  нейрона как точки полиэдра вида (5), порожденного наборами входных сигналов, определяющихся векторами исследуемых массивов векторов [6].

Полиэдральный подход к моделированию узлов электронных схем может быть использован также при анализе двоичного преобразователя, работа которого описывается уравнением

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = u, \quad (6)$$

где  $u$  – выходной двоичный сигнал преобразователя, а  $x_i$  –  $i$ -й входной двоичный сигнал;

$i = 1, 2, \dots, n$  – номер канала входа,  $x_i = 0$  или  $1$ , а  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – булева функция.

Так, например, множество всех векторов вида  $(x_1, x_2, \dots, x_n, u)$ , удовлетворяющих соотношению (6), можно представить в виде множества  $(0; 1)$  – точек полиэдра, соответствующего системе неравенств вида

$$\begin{cases} -r_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + (0,5 - n_i) y_i \leq n_i - r_i - 1 \\ -m + 1,5 \leq \sum_{j=1}^m y_j + (0,5 - m) u \leq 0,5 \end{cases}, \quad (7)$$

$(i = 1, 2, \dots, m).$

где  $x_i, y_i, u$  принимают значения 0 или 1;

$a_{ij} = 0$  или  $\pm 1$ ;

$n_i$  – число ненулевых коэффициентов  $a_{ij}$  в  $i$ -м ограничении,

$r_i$  – число отрицательных коэффициентов в  $i$ -м ограничении,

По системе (7) можно однозначно определить булеву функцию

$$u = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \vee y_2 \vee \dots \vee y_m, \quad (8)$$

где

$$y_i = x_{j_1}^{\sigma_1(i)} \& x_{j_2}^{\sigma_2(i)} \& \dots \& x_{j_{n_i}}^{\sigma_{n_i}(i)} \quad (9)$$

$$\{j_1, j_2, \dots, j_{n_i}\} \subset \{1, 2, \dots, n\}; j_1 < j_2 < \dots < j_{n_i}$$

причем

$$x_{j_k}^{\sigma_k(i)} = \begin{cases} x_{j_k}, & \text{если } a_{j_k} = 1 \\ \bar{x}_{j_k}, & \text{если } a_{j_k} = -1 \end{cases}$$

Верно и обратное утверждение. По заданной в виде (4) булевой функции можно однозначно определить полиэдр (7).

Подобный полиэдральный подход может быть использован для решения задачи реализации узла преобразований (6) системой, состоящей из  $m$  формальных нейронов.

Набор весовых коэффициентов  $i$ -го нейрона этой системы определяется вектором  $(a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_n^{(i)})$ , где  $a_j^{(i)} = 0$  или  $\pm 1$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Функция активации, определяющая работу  $i$ -го нейрона, имеет вид

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^n a_j^{(i)} x_j^{(i)} \geq d, \\ 0, & \text{если } \sum_{j=1}^n a_j^{(i)} x_j^{(i)} < d, \end{cases}$$

где  $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})$  – вектор входа  $i$ -го нейрона ( $x_j^{(i)} = 0$  или  $1$ ), а  $y_i$  – его двоичный выход ( $y = 0$  или  $1$ ).

В том случае, если  $d_i = n_i - r_i - 0,5$ , где  $n_i$  – число ненулевых весовых коэффициентов  $i$ -го нейрона, а  $r_i$  – число отрицательных весовых коэффициентов,  $i$ -й нейрон реализует булеву функцию вида (9).

Далее, если вектор  $(y_1, \dots, y_m)$  является входным вектором для формального нейрона с функцией активации:

$$f = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^m y_j \geq 1 \\ 0, & \text{если } \sum_{j=1}^m y_j < 1 \end{cases}$$

то этот формальный нейрон реализует функцию (6).

В заключение отметим связь упомянутой выше задачи настройки формального нейрона с задачей определения чебышевского решения системы линейных неравенств.

Рассмотрим пороговую функцию активации  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , имеющую вид:

$$z = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^n a_i x_i > b \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где параметры функции  $b, a_i, +, \cdot, >$  – действительные числа и отношения, а неизвестные  $x_i = 0$  или 1.

Задачей настройки формального нейрона, распознающего массивы  $X$  и  $Y$ , называется задача определения  $a_1, a_2, \dots, a_n, b$  (или  $a_1, a_2, \dots, a_n$  при заданном  $b$ ) таких, что

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j^{(i)} \leq b, \quad (i = 1, 2, \dots, t_1) \quad (10)$$

и

$$\sum_{j=1}^n a_j y_j^{(k)} > b, \quad (k = 1, 2, \dots, t_2), \quad (11)$$

где

$$X = \{(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})\}, |X| = t_1 \text{ и}$$

$$Y = \{(y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, \dots, y_n^{(k)})\}, |Y| = t_2.$$

Если система неравенств (10)–(11) совместна, то любое ее решение  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  при заданном  $b$  определяет пороговую функцию. В противном случае приходится рассматривать возможность приближенного решения задачи, то есть построение функции  $z = f(x_1, \dots, x_n)$ , которая будет принимать нулевые значения не только для векторов массива  $X$ , но, возможно, и для некоторых векторов массива  $Y$ . Качество приближения зависит от числа таких векторов.

В этом случае предлагается рассмотреть задачу чебышевского приближения системы линейных неравенств, которая равносильна системе (10)–(11)

$$\eta_i \equiv \eta_i(\tilde{a}) = \sum_{j=1}^n a_j x_j^{(i)} - b \leq \varepsilon \quad (i = 1, 2, \dots, t_1), \quad (12)$$

$$\omega_k \equiv \omega_k(\tilde{a}) = -\sum_{j=1}^n a_j y_j^{(k)} + b + z_k \leq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, t_2), \quad (13)$$

где  $\varepsilon = (a_1, a_2, \dots, a_n, z_1, z_2, \dots, z_{t_2})$  – неизвестный вектор, то есть задачу определения величины  $L$ , где

$$L = \min_{\tilde{a}} \max(\max_{1 \leq i \leq t_1} \eta_i(\tilde{a}), \max_{1 \leq k \leq t_2} \omega_k(\tilde{a})) = \max(\max_{1 \leq i \leq t_1} \eta_i(\tilde{a}^*), \max_{1 \leq k \leq t_2} \omega_k(\tilde{a}^*)). \quad (14)$$

Система (12)–(13) совместна тогда и только тогда, когда  $L \leq 0$ . Если же  $L > 0$ , то система несовместна. Задача определения  $\varepsilon^*$  называется задачей чебышевского решения системы (12)–(13) при ее совместности и задачей чебышевского приближения этой системы при ее несовместности. Эта задача может быть сведена к задаче линейного программирования [7].

Построенная таким образом пороговая функция  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , для которой пороговое значение  $b$ , вообще говоря, может быть скорректировано величиной  $L$ , разумеется, не позволяет решить задачу распознавания массивов. Оценка качества пороговой функции  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  в общем виде до сих пор не получена. В частных случаях возможно использование оценки (4).

### Библиографический список

1. Балакин, Г.В. Методы сведения булевых уравнений к системам пороговых соотношений / Г.В. Балакин, В.Г. Никонов // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 1994. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 389–401.
2. Головкин, Б.А. О некоторых линейных ограничениях с булевыми переменными / Б.А. Головкин // Экономика и математические методы. – 1971. – Т. VII. – Вып. 4. – С. 25–31.
3. Рыбников, К.К. Оценки сложности некоторых схем метода разделяющих плоскостей при решении систем булевых уравнений / К.К. Рыбников // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2002. – Т.9. – Вып. 2. – С. 442–443.
4. Рыбников, К.К. О взаимосвязях различных алгоритмических схем методов погружения множества решений системы булевых уравнений в действительную область / К.К. Рыбников, А.С. Хохлуш-



- кин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2002. – № 5 (25). – С. 189–194.
5. Гаврилкевич, М.В. Введение в нейроматематику / М.В. Гаврилкевич // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 1994. – Т. 1. – Вып. 3. – С. 377–388.
  6. Никонов, В.Г. Применение полиэдральных методов в прикладных математических задачах, сводящихся к анализу и решению системы линейных неравенств / В.Г. Никонов, К.К. Рыбников // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2003. – № 1(26). – С. 81–84.
  7. Зуховицкий, С.И. Линейное и выпуклое программирование / С.И. Зуховицкий, Л.И. Авдеева. – М.: Наука, 1967 – 460 с.
  8. Рыбников, К.К. Методы анализа псевдоболевых систем линейных неравенств и их приложения к изучению узлов нейросетей / К.К. Рыбников // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2007. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 561–563.
  9. Hammer P.L. Boolean Elements in Combinatorial Optimization. – «Combinatorial Programming: Method and Application». Dordrecht – Boston, 1968.

## ИНТЕГРАЦИЯ НЕОДНОРОДНЫХ БАЗ ДАННЫХ С МЕНЯЮЩИМИСЯ СВЯЗЯМИ СУЩНОСТЕЙ

Д.В. СУХОРУЧЕНКОВ, *асп. каф. вычислительной техники МГУЛ*

*sukhoruchenkov@mail.ru*

В работе рассмотрен, предложен и проверен принцип построения интеграционной системы, особенность которой заключается в следующем:

- система имеет возможность предоставлять аналитическую информацию на основе данных как вводимых пользователем, так и загружаемых из других информационных систем;

- система является центральным связующим звеном в сети разнородных и распределенных баз данных (БД);

- между любыми двумя сущностями в системе можно организовать связь по произвольному логическому условию;

- в структуре БД может быть неограниченное число сущностей;

- используя запросы к данным, система находит как информацию, удовлетворяющую критериям отбора, так и связанную с найденной;

- пользовательский интерфейс отображает найденную информацию интуитивно в виде графов;

- пользователь может связывать данные по произвольному логическому условию;

- пользователь имеет возможность самостоятельно создавать новые объекты хранения (таблицы), которые ранее не существовали в структуре БД.

Известно, что отношение «многие ко многим» описываются четвертой нормальной

формой[1]. Между двумя сущностями отношение «многие ко многим» реализуется путем введения ассоциативной сущности, в которой отводится запись для каждой уникальной комбинации. Но такой способ может быть использован, если заранее известно, какие таблицы будут связаны. Если связь с любой сущностью в системе может возникнуть неожиданно, такой способ разрешения задачи не рационален.

Пусть мы имеем три сущности, между которыми необходимо установить связь типа «многие ко многим», как показано на рис. 1.

Для нормализации схемы данных и приведения ее в четвертую нормальную форму создаются дополнительно три ассоциативные сущности (рис. 2).

В случае, если понадобится добавить еще одну сущность, то для реализации связей абсолютного графа переходов понадобится использовать шесть ассоциативных сущностей. Число связей увеличивается в геометрической прогрессии с увеличением сущностей, что сильно замедляет работу интеграционной системы.

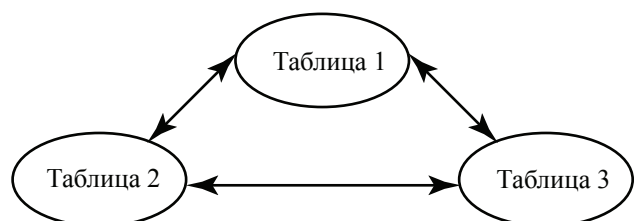


Рис. 1. Абсолютный граф переходов

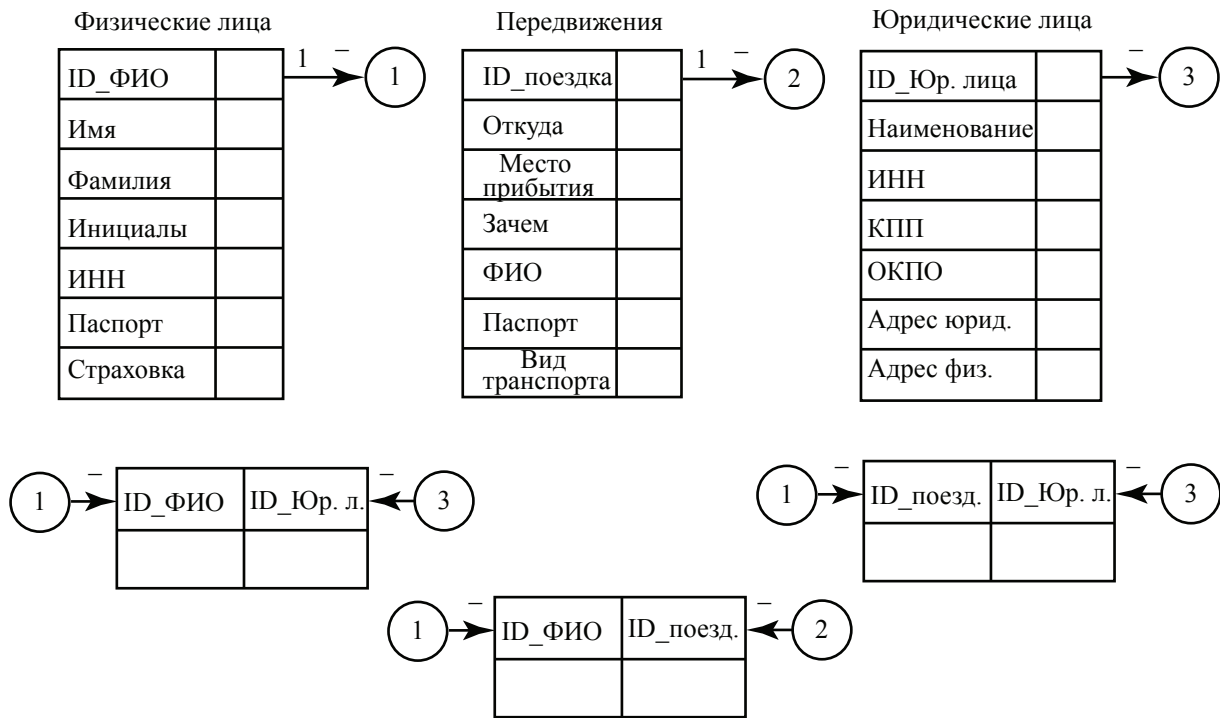


Рис. 2. Связь «многие ко многим», реализованная при помощи ассоциативных сущностей



Рис. 3. Центральная ассоциативная сущность (в OLAP-технологии): ID1 – идентификатор первого картежа; ID2 – идентификатор второго картежа; table1 – имя первой сущности, в которой присутствует идентификатор первого картежа; table2 – имя второй сущности, в которой присутствует идентификатор второго картежа; description – характеристика связи

Опыт, проведенный на пользовательской машине с тактовой частотой процессора 2,8 гигагерц и с оперативной памятью 1 Гб, показал, что скорость обработки данных становится низкой при поиске по таблицам, хранящим не более 1000 записей.

Для реализации интеграционной системы с отмеченными ранее характеристиками предложена и опробована модернизированная и расширенная OLAP-технология [2], в основе

которой лежат понятия измерения и мер. Измерения – это разделения на категории или группировка данных, а мера – консолидируемое значение. Например, в задаче консолидации объема продаж по кварталам и подразделениям мерой является объем продаж, а измерениями – квартал и подразделение. Такая технология хранения консолидируемых данных используется для быстрого создания отчетов, а также просто для представления статисти-

ческой информации. В основе хранения таких данных лежит хранилище данных, структура хранилища основана на схеме «звезда».

Сам механизм схемы «звезда» можно использовать и в рассматриваемой системе, но в основе схемы, проектируемой БД, будет лежать таблица, которая хранит не консолидируемые данные, а связи любого вида с любым условием для любых двух сущностей. Только с использованием центральной ассоциативной сущности можно добиться хранения любых, ранее не определенных связей. При выборке данных, удовлетворяющих условиям поиска, при просмотре центральной таблицы можно отобразить всю связанную с найденными данными информацию и предоставить ее пользователю в виде графов.

Атрибуты новой ассоциативной сущности представлены на рис. 3.

Центральная ассоциативная сущность хранит имена связанных сущностей и идентификаторы связанных кортежей, а также описание причины, по которой записи были связаны.

Предположим, пользователь новой информационной системы вводит критерии поиска, и результатом запроса являются две записи, у которых есть два уникальных идентификатора. После, вторым этапом, информационная система выполняет второй запрос по центральной ассоциативной сущности, параметрами поиска этого запроса являются два найденных идентификатора. Результатом поиска второго запроса будут все связанные данные, хранящиеся в информационной системе. Результат запроса можно отобразить в виде

графов, где в центре находится имя таблицы, по которой осуществлялся первоначальный поиск и найденная запись в ней, а вокруг аналогично будут изображены все связанные данные. В идеальном варианте запросы к данным не будут содержать ни одного оператора JOIN (и это при использовании неограниченного количества таблиц), что положительно скажется на быстродействии системы.

Предложенная схема хранения данных вбирает в себя преимущество OLAP-технологии для создания отчетов, данные консолидируются по центральной ассоциативной сущности.

Первый опыт работы информационной системы, построенной на базе модернизированной и расширенной OLAP-технологии, показал хороший результат. При добавлении новых сущностей, не предусмотренных при первоначальном проектировании информационной системы, достаточно просто зарегистрировать их в соответствующем списке и добавить новые записи в центральную ассоциативную сущность о новых непредвиденных связях.

#### Библиографический список

1. Дейт, К.Дж. Введение в системы баз данных: научно-популярное издание. – 8-е изд. / К.Дж. Дейт; под. общ. ред. А.Г. Тругиб. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – С. 496–501.
2. Нильсен, Пол. Microsoft SQL Server 2005. Библия пользователя: научно-популярное издание / Пол. Нильсен; под. общ. ред. С.Н. Тругиб.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – С. 936–939.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ XML

А.В. ЧЕРНЫШОВ, доц. каф. вычислительной техники МГУЛ, канд. техн. наук

*sch@mgul.ac.ru*

**Б**ортовая телеметрическая аппаратура (БТА) является одним из видов бортовой радиоэлектронной аппаратуры, к качеству функционирования которой всегда предъявляются повышенные требования. С целью подтверждения характеристик, заложенных при проектировании, аппаратура проходит

многочисленные испытания: предварительные и приемо-сдаточные на заводе-изготовителе, входной и периодический контроль у потребителя, контроль работоспособности на изделии и некоторые другие виды контроля. Контроль характеристик проводится в виде испытаний аппаратуры как при нормальных

условиях окружающей среды, так и при условиях, на эксплуатацию в которых рассчитана аппаратура.

По результатам каждого испытания должен быть оформлен документ, являющийся протоколом испытания, подтверждающий исправность аппаратуры либо указывающий на сбой в ее работе. В настоящее время в испытаниях аппаратуры активную роль играют персональные ЭВМ (ПЭВМ), обеспечивающие автоматизацию процесса испытаний и автоматическое формирование протоколов испытаний.

Процесс испытаний БТА и формируемые по их результатам протоколы имеют свои особенности по сравнению с испытаниями и протоколами других видов бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Это связано прежде всего с необходимостью контролировать большие массивы информации, представляющие собой потоки телеметрической информации (ТМИ), содержащие результаты измерений показаний датчиков, установленных на изделии. В современной БТА количество опрашиваемых датчиков варьируется от нескольких десятков до нескольких тысяч. И в процессе контроля БТА необходимо проверить и подтвердить качество передачи измерительной информации по каждому каналу. При документировании результатов испытаний в протокол также должна быть включена информация о качестве функционирования каждого измерительного канала.

Обычно при проведении автономных испытаний БТА (это все виды испытаний БТА, не установленной на изделие) вместо реальных датчиков физических величин ко входам БТА подключают имитаторы сигналов, обеспечивающие формирование по каждому измерительному каналу заранее известных постоянных уровней, что позволяет выполнять испытания с применением ПЭВМ в полностью автоматическом режиме и автоматически формировать по результатам испытаний итоговые протоколы со всеми необходимыми результатами.

### **Протокол испытаний БТА**

Главной проблемой при формировании протокола испытания БТА является необходимость отображения в нем характеристик

измерительных каналов, полученных в результате данного испытания. Причем, регистрируемые характеристики должны допускать возможность сравнения результатов разных испытаний одного и того же экземпляра БТА, но при этом должны быть достаточно компактными, чтобы не перегружать протокол избыточным объемом информации.

Как показала практика проведения испытаний реальных БТА, очень удобным способом представления характеристик каналов в протоколах испытаний является статистический, при котором в протокол заносятся статистические характеристики измерительных каналов, рассчитанные для каждого канала в процессе проведения испытания. Для автономных испытаний БТА с имитаторами сигналов, задающими статические уровни, наиболее подходящими являются следующие характеристики: математическое ожидание (среднее значение измерений в канале), среднеквадратическое отклонение, минимальное значение измерения в канале, максимальное значение измерения в канале, количество обработанных точек, количество точек, вышедших за границы допуска. Все указанные характеристики рассчитываются на всем протяжении испытания (на всем наборе измерительных данных, полученных по каналу). Для полноты картины эти статистические характеристики в протоколе дополняются ожидаемыми значениями (номинальное значение имитируемого сигнала и допустимые отклонения).

Кроме характеристик измерительных каналов, в протокол должны быть включены и общие для экземпляра БТА данные, такие как заводской номер, напряжение питания, ток потребления, условия окружающей среды и т. п. Обязательным является также включение в протокол даты и времени проведения испытания и итогового результата («Годеи/Не годен»).

При наличии технической возможности в протокол могут быть также занесены фамилии и должности испытателей. Но практическая реализация этой возможности затруднена, так как требование к испытателям вводить при каждом испытании свои фамилии и должности с клавиатуры (или выбирать



из списка, если он есть на ПЭВМ) приводит к значительному усложнению и интерфейса пользователя, и контролирующей программы, и правил работы испытателей, не улучшая при этом качество контроля. А автоматизация ввода этой информации посредством, например, применения индивидуальных ключей, требует дополнительных затрат на изготовление этих ключей для всех испытателей и соответствующие доработки контролирующих программ, что на данный момент признано нецелесообразным.

Таким образом, типичный протокол, сформированный по результатам испытания БТА, представляет собой некоторую «шапку», содержащую общую информацию об испытании (заводской номер и др.), таблицу, каждая строка которой описывает результаты контроля индивидуальных измерительных каналов БТА, и итоговые записи об исправности или неисправности БТА.

Не представляет большого труда так составить программу формирования протокола, чтобы результат был пригоден для прямого вывода на принтер и подшивки напечатанного документа в технологический паспорт экземпляра БТА. Однако тот факт, что протокол формируется на ПЭВМ, предполагает возможность накопления протоколов испытаний одного и того же экземпляра БТА с возможностью последующего автоматизированного анализа для выяснения неочевидных зависимостей в поведении БТА на протяжении жизненного цикла.

### **Проблема накопления информации протоколов**

Простейшим способом накопления информации протоколов испытаний является формирование протоколов в виде простых текстовых потоков, готовых к прямой печати на принтере, и сохранение этих потоков в единый файл протокола на жестком диске ПЭВМ, используемой при испытаниях. Под текстовым потоком здесь понимается последовательность текстовых строк, содержащая только печатные символы, которые могут быть непосредственно напечатаны на принтере или сохранены в файл и прочитаны любым простейшим текстовым редактором.

В этом случае каждая строка представляет собой читабельный текст. Это либо запись об общем параметре БТА (заводской номер экземпляра, дата проведения испытания и т. п.), либо строка таблицы с параметрами, описывающими поведение измерительного канала.

Такие протоколы легко формировать, их легко просматривать (для этой цели годится любая стандартная программа просмотра текста или любой простейший текстовый редактор), легко печатать (прямым направлением на принтер) и легко накапливать (обычным дополнением в конец единого файла протокола). Но у этого способа накопления протоколов имеются серьезные недостатки.

Во-первых, при большом количестве протоколов испытаний, собранных в одном файле, значительно усложняются программы группового анализа протоколов, так как затрудняется выделение из общего набора данных необходимых для анализа строк. Отказ же от сохранения всех протоколов в одном файле и сохранение каждого протокола в отдельном файле очень быстро приводит к разрастанию количества файлов и невозможности разумно ими управлять. Кроме этого значительно усложняется реализация поиска в протоколах необходимой информации, так как вместо поиска по содержимому одного файла необходимо искать по большому количеству файлов.

Во-вторых, в процессе испытаний время от времени (в частности, только для определенных видов испытаний) возникает необходимость в указании значений специфических параметров. Например, при проверке БТА в вакуумной камере в протокол должно быть включено значение давления, а при проверках БТА в нормальных условиях указание значения атмосферного давления (которое может колебаться в зависимости от погоды) большого смысла не имеет. Вместо этого должно быть указано, что испытания проводятся в нормальных условиях окружающей среды, что предполагает незначительные колебания параметров, не являющиеся критическими для работы БТА.

Для устранения недостатков рассмотренного способа напрашивается реализация накопления информации протоколов испыта-

ний в виде базы данных (БД) на платформе одной из распространенных СУБД. Однако, как показали исследования, для полноценного накопления и хранения информации о результатах испытаний с возможностью всестороннего анализа структура БД получается очень сложной. Прежде всего, это связано с неоднородной структурой заносимой в протокол информации. Кроме этого, крайне сложно учесть все нюансы структуры протокола при первоначальном проектировании системы испытаний. Обычно в процессе отладки объем и структура информации, заносимой в протокол, может меняться. Как следствие, практически невозможно сразу спроектировать структуру БД для хранения информации протоколов. А в силу сложности структуры этой БД ее модификация в процессе отладки или последующей доработки крайне затруднена.

Способ накопления информации в БД неудобен еще и тем, что на каждой ПЭВМ, участвующей в испытаниях, необходимо разворачивать копию СУБД и вести ее сопровождение. Программы контроля БТА, применяемые при испытаниях, должны быть разработаны с учетом необходимости поддержки связи с СУБД, что значительно усложняет систему. А чем сложнее система, тем вероятнее ошибки в проектировании и сбой в работе.

Наконец, этот способ неудобен еще и тем, что каждый отдельный протокол нигде не хранится как самостоятельный документ, и для просмотра протоколов испытаний человеком или печати их на принтере требуется разработка специальных программ, которые будут «собирать» протоколы из разрозненных данных, разбросанных по разным таблицам БД и связанных лишь отношениями в структуре БД.

Таким образом, задача формирования протоколов испытаний БТА с последующим их накоплением имеет много нюансов. Оптимальное ее решение лежит между простым формированием единого текстового файла протоколов и использованием СУБД.

#### **Решение задачи накопления протоколов на базе технологии XML**

Наиболее удобным для решения рассмотренной задачи представляется использо-

вание технологии XML. Сам XML является метаязыком, на котором могут быть описаны многие языки тегов, предназначенные для целевой, обычно логической разметки текстов. Разметка выполняется тегами, вписанными прямо в текст документа.

Отличительной особенностью технологии XML является наличие стандартного инструментального ПО, позволяющего, независимо от набора тегов и при небольших затратах труда программистов, осуществить выборку из размеченного документа любой его части, помеченной тегами. Более того, с применением того же инструментального ПО возможно полное переформатирование документа для применения его в различных целях. Так, один и тот же размеченный исходный документ (в данном случае протокол испытания) может быть:

- подвергнут обработке с целью извлечения необходимой информации (например условий проведения испытания);
- преобразован в обычную текстовую форму для представления на экране текстового терминала;
- преобразован в формат HTML для отображения на удаленном рабочем месте посредством технологии Интранет;
- преобразован в формат, пригодный для распечатки на принтере с последующей подшивкой в паспорт БТА (например в формат pdf);
- подвергнут совместной обработке с другими протоколами испытаний с целью обобщения и анализа информации о совокупности испытаний (в частности, для анализа стабильности измерительных каналов в процессе нескольких испытаний).

Важным удобством использования технологии XML является возможность формирования протоколов испытаний без привлечения дополнительного ПО, в частности СУБД. Поскольку исходный протокол испытания формируется как простой текстовый файл с «вкраплениями» тегов разметки, также представляющих собой текст, вся эта работа может быть выполнена непосредственно контролирующими программами.

Более того, каждый протокол в итоге сохраняет свою самостоятельность, сущес-

твует как документ и может быть прочитан оператором ПЭВМ с применением стандартных программ просмотра и/или редактирования текста. Чтению будут лишь немного мешать теги разметки, но все же любая информация может быть извлечена из протокола довольно легко.

Фрагмент протокола одного испытания может выглядеть, например, следующим образом:

```
<protokol>
<date>2007-11-05</date><time>13:55:25</time>
<number>12345678</number>
<Upit>27</Upit><Ipot>2.5</Ipot>
<sreda><NU/></sreda>
<channel>
<name>K01</name><norma>10</norma><plus>2</plus><minus>2</minus>
<min>9</min><max>11</max><srednee>10</srednee>
</channel>
<channel>
<name>K02</name><norma>25</norma><plus>2</plus><minus>2</minus>
<min>24</min><max>25</max><srednee>24.8</srednee>
</channel>
<channel>
<name>K03</name><norma>48</norma><plus>2</plus><minus>2</minus>
<min>48</min><max>48</max><srednee>48</srednee>
</channel>
<result><NORMA/></result>
</protokol>
```

В данном примере показана основная идея формирования протокола. Каждый протокол как единый документ обрамлен тегами <protokol>. Теги <date>, <time> описывают соответственно дату и время проведения испытания. Тег <number> использован для записи заводского номера испытываемого блока. Теги <Upit>, <Ipot> содержат информацию о напряжении питания и токе потребления соответственно. В тегах <sreda> записана информация об условиях внешней среды. В данном примере эти условия выражены специальным тегом, означающим «нормальные условия». Могут быть записаны и другие теги, предназначенные для сохранения какой-

либо еще информации, относящейся ко всему испытываемому блоку.

Далее в тегах <channel> записана информация о поведении в процессе испытания каждого канала. Смысл используемых тегов должен быть понятен из их названий. Для упрощения примера записаны не все поля, предложенные выше для сохранения в протоколе. Всего показана запись информации о трех каналах. В реальности таких записей должно быть столько, сколько измерительных каналов в испытываемом блоке.

В конце протокола в тегах <result> записан интегральный результат испытания. В данном случае записан тег, являющийся признаком нормы.

Интересно отметить тот факт, что с точки зрения технологии XML при составлении документа важно соблюдать лишь вложенность тегов. Порядок же следования тегов одного уровня вложенности роли не играет, если только это не оговорено особо при проектировании языка тегов описания протокола. При подготовке протокола к печати необходимо выполнение XSLT преобразования, которое способно разместить в итоговом документе информацию, описываемую тегами, в нужном порядке.

Сформированные описанным способом протоколы могут быть легко накоплены в одном текстовом файле. В результате формируется база данных протоколов, которая допускает как обработку отдельных протоколов, так и совместную обработку множества протоколов, как всех, так и отобранных по определенным критериям. Отбор и обработка протоколов могут быть выполнены через XSLT преобразование, либо через применение моделей документов DOM или SAX. Подробное рассмотрение этих возможностей выходит за рамки настоящей статьи. Важно подчеркнуть однозначность выборки обрабатываемых данных и относительную простоту доступа к данным и поиска.

Полученная база данных относится к новому типу, получившему название Document Oriented (Ориентированная на документы), в противоположность широко распространенным Data Oriented (Ориентированным на данные) базам, в частности,

реляционным. При необходимости накопленные в текстовом файле протоколы могут быть легко перенесены для дальнейшей обработки в СУБД, поддерживающей запросы, ориентированные на документы. Такая СУБД может быть очень полезна как средство централизованного накопления, обработки и представления результатов испытаний по совокупности комплектов БТА. Она может быть установлена на сервере, к которому организован доступ по технологии Intranet, что дает возможность оперативно получать необходимую информацию по результатам испытаний всем заинтересованным специалистам, разрабатывающим, изготавливающим и эксплуатирующим БТА.

В качестве примера такой готовой СУБД с поддержкой запросов, ориентированных на документы, укажем последние версии СУБД PostgreSQL с расширением XML2.

### Заключение

Для решения задачи формирования и накопления протоколов испытаний БТА технология XML оказывается очень удобной. Она не требует наличия каких-либо специализированных программных средств на ПЭВМ, выполняющих испытания и формирующих протоколы, поскольку вся разметка протоколов выполняется обычными тегами, вставляемыми непосредственно в операто-

ры печати результатов испытаний. Итоговый протокол остается читабельным для стандартных средств просмотра и редактирования текстовых файлов.

Вместе с тем итоговый файл протоколов представляет собой размеченную базу данных, которая может быть обработана с целью формирования печатного отчета или извлечения определенных данных для автоматизированной обработки. Форматирование, поиск и извлечение данных могут быть выполнены при помощи стандартных средств, имеющихся на сегодняшний день в распространенных операционных системах.

Протоколы испытаний, полученные на разных ПЭВМ, могут быть объединены в единой СУБД, ориентированной на документы, для хранения, поиска, совместной обработки и представления, в том числе по технологии Intranet.

### Библиографический список

1. Чернышов, А. Программное обеспечение рабочего места контроля бортовой телеметрической аппаратуры / А. Чернышов. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 160 с.
2. Хабибуллин, И. Самоучитель XML / И. Хабибуллин. – Спб.: «БХВ-Петербург», 2003. – 336 с.
3. Кэгл, К. XML. / К. Кэгл, Д. Хантер, Д. Гиббсон и др. – М.: Лори, 2006. – 638 с.
4. Маршал, Б. XML в действии / Б. Маршал. – М.: Триумф, 2002. – 368 с.
5. <http://www.postgresql.org>

## ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ

Р.С. ЯКУШЕВ, *асп. каф. систем автоматического управления МГУЛ*

*rsyakushev@gmail.com*

**О**строта проблемы обеспечения безопасности субъектов информационных отношений, защиты их законных интересов при использовании информационных и управляющих систем, хранящейся и обрабатываемой в них информации все более возрастает.

Трудности решения практических задач обеспечения безопасности в автоматизированных системах связаны с отсутствием развитой стройной теории и необходимых научно-технических и методических основ

обеспечения защиты информации в современных условиях.

Прежде всего необходимо понять, что такое безопасность информационных технологий (информации), определить, что (кто) от чего (кого), почему (зачем) и как (в какой степени и какими средствами) необходимо защищать [1].

В общих понятиях безопасность есть защищенность от возможного ущерба, наносимого при реализации опасности (угрозы).



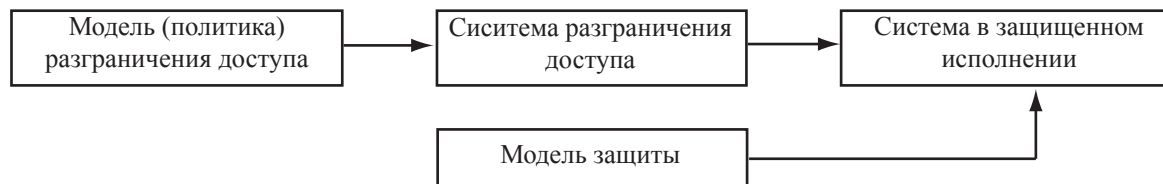


Рис. 1

Sub	MP	Obj	DB	Shared Files	Config Files	Devices
User group	1	MP	2	1	3	2
User	2					
Administrator	3					

Рис. 2

Sub \ Obj	MP	Shared Files	Config Files	Devices
User group	R	R/W	—	R
User	R/W	R	—	R/W
Administrator	R/W/D	R/D	R/W/D	R/W/D

Рис. 3

Для защиты информации от несанкционированного доступа создается модель защиты – абстрактное (формализованное или неформализованное) описание комплекса программно-технических средств или организационных мер защиты от несанкционированного доступа.

Для управления доступом пользователей (субъектов доступа) к информации (объектам доступа) создается система разграничения доступа – совокупность различных правил разграничения доступа.

Система разграничения доступа отражает выбранную модель (политику) разграничения доступа. Последовательность построения системы в защищенном исполнении представлена на рис. 1.

Существует две основные политики безопасности: мандатная и дискреционная.

**Мандатной политикой безопасности** (модель Белла-Ла Падулла) считается любая политика, логика и присвоение атрибутов безопасности которой контролируются

системным администратором безопасности [2]. Пример реализации мандатной политики представлен на рис. 2.

**Дискреционная политика безопасности** (модель Харрисона-Руззо-Ульмана) считается любая политика, в которой пользователи могут принимать участие в определении функций политики и/или присвоении атрибутов безопасности [2]. Пример реализации мандатной политики представлен на рис. 3.

У каждой модели есть ряд преимуществ, кроме того, в некоторых операционных системах эти модели реализованы совместно и дополняют друг друга, однако есть общий недостаток, присущий всем моделям безопасности – до сих пор не существует методического аппарата, позволяющего анализировать результаты реализации выбранной модели безопасности. Это значительно затрудняет работу специалиста, занимающегося проектированием систем в защищенном исполнении.

Однако существует теория, позволяющая решить данную проблему. Такой теорией

является **теория сетей Петри**, моделирование в которой осуществляется на событийном уровне, при этом определяется, какие действия происходят в системе, какие состояния предшествовали этим действиям и какие состояния примет система после выполнения действия.

Развитие теории сетей Петри проводилось по двум направлениям. Формальная теория сетей Петри занимается разработкой основных средств, методов и понятий, необходимых для применения таких сетей. Прикладная теория сетей Петри связана главным образом с применением сетей Петри к моделированию систем, их анализу и получающимся в результате этого глубоким проникновением в моделируемые системы [3, 4].

Применение данной теории к моделированию системы в защищенном исполнении позволит определить эффективность и выявить слабые стороны реализации выбранной политики разграничения доступа субъектов системы к информационным ресурсам.

### Основные положения теории сетей Петри

Сеть Петри состоит из четырех элементов: множество *позиций*  $P$  (схематически обозначаются кружками), множество *переходов*  $T$  (обозначаются черточками), входная функция  $I$  и выходная функция  $O$ . Входная и выходная функция связаны с переходами и позициями. Входная функция  $I$  отображает переход  $t_j$  в множество позиций  $I(t_j)$ , называемых входными позициями перехода. Выходная функция  $O$  отображает переход  $t_j$  в множество позиций  $O(t_j)$ , называемых выходными позициями перехода [5]. Структура сети Петри определяется ее позициями, переходами, входной и выходной функциями, т.е. сеть Петри  $S$  задается четверкой вида

$$S = \langle P, T, I, O \rangle.$$

Представленная таким образом сеть Петри  $S$  может использоваться только для отражения статистики моделируемой системы (взаимосвязи событий и условий), но не позволяет отразить в модели динамику функционирования моделируемой системы. Для представления динамических свойств объекта вводится функция маркировки (разметки)  $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ . Маркировка  $M$  есть присвое-

ние неких абстрактных объектов, называемых метками (фишками), позициям сети Петри, причем количество меток, соответствующее каждой позиции, может меняться [6].

Маркированная (размеченная) сеть Петри может быть описана в виде  $S_M = \langle P, T, I, O, M \rangle$  и является совокупностью сети Петри  $S$  и маркировки  $M$  [5].

Фишки используются для определения выполнения сети Петри. Фишки находятся в кружках (позициях) и управляют выполнением переходов сети. Функционирование сети Петри отражается путем перехода от разметки к разметке. Начальная разметка обозначается как  $M_0$ . Сеть Петри выполняется путем срабатывания (запуска) переходов. Выполнением сети Петри управляют количество и распределение фишек в сети. Переход запускается удалением меток из его входных позиций и образованием новых меток, помещаемых в выходные позиции. Переход может запускаться только в том случае, когда он разрешен. Переход называется *разрешенным*, если каждая из его входных позиций имеет число меток, по крайней мере равное числу дуг из позиции в переход [6].

### Применение теории сетей Петри для создания модели защиты информации в автоматизированных системах

В качестве примера применения теории сетей Петри для моделирования систем в защищенном исполнении рассмотрим процесс доступа субъекта к объекту системы. Структура сети Петри, моделирующей данный процесс, представлена на рис. 4.

В этой схеме (рис. 4) могут быть следующие состояния:

$p_1$  – поступил запрос субъекта на доступ к объекту;

$p_2$  – обработка запроса;

$p_3$  – доступ к объекту разрешен;

$p_4$  – метка доступа к объекту;

и могут происходить следующие события:

$t_1$  – поступление запроса субъекта на доступ к объекту;

$t_2$  – начало обработки запроса;

$t_3$  – конец обработки запроса;

$t_4$  – предоставление доступа субъекта к объекту.

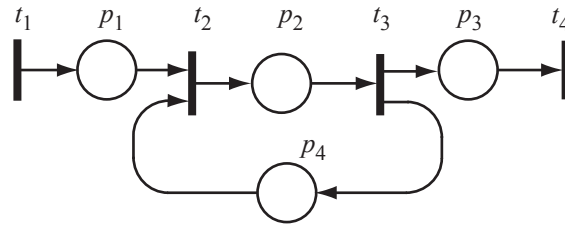


Рис. 4.

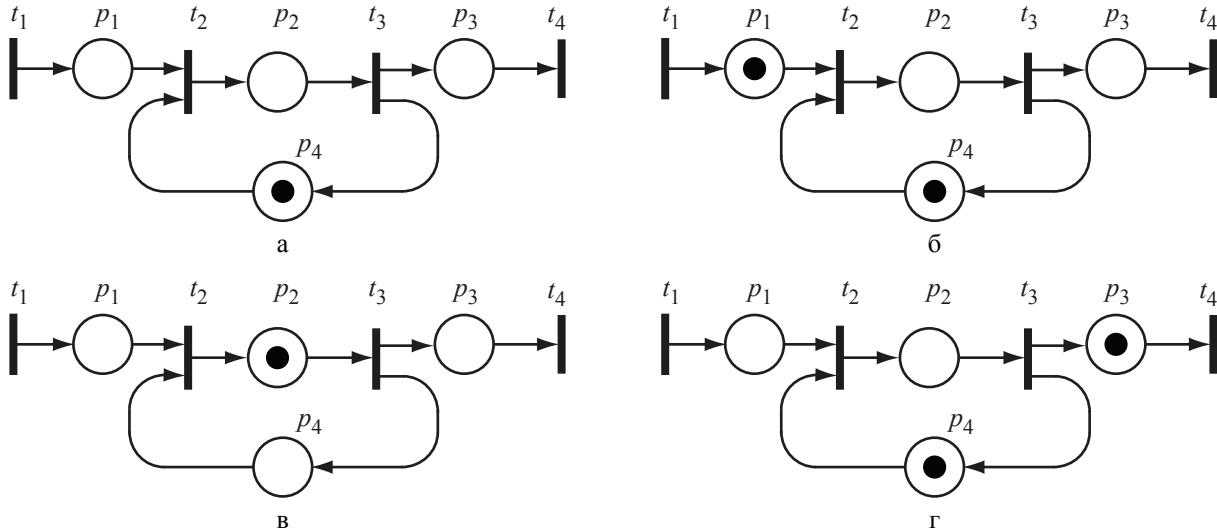


Рис. 5

Предположим, что начальная разметка сети, моделирующей процесс доступа субъекта к объекту, остается нулевой:  $M_0 = (0,0,0,0)$ . Тогда при поступлении запроса ( $p_1 = 1$ ) на доступ к объекту предоставлен не будет, т.к. в схеме не будет переходов, которые могут сработать. Однако, если начальная маркировка будет  $M_0 = (0,0,0,1)$  (рис. 5 а), переход  $t_2$  при поступлении запроса ( $p_1 = 1$ ) (рис. 5 б) станет разрешенным, и в конечном итоге доступ к объекту будет разрешен (рис 5 в, г).

Таким образом, применение сетей Петри для создания модели защиты информации в автоматизированных системах обработки данных и управления, позволяет анализировать результаты, выявлять ошибки реализации выбранной модели безопасности и определять эффективность защиты.

**Библиографический список**

1. Безопасность информационных технологий. Руководство слушателя курса. – М.: Учебный центр «Информзащита», 2002. – 208 с.
2. Кулябов, Д.С. Необходимость обеспечения безопасности операционных систем на системном уровне / Д.С. Кулябов, А.В. Королькова // Вестник РУДН. – 2004. – Т. 3. – № 1. – С. 144–161.
3. Калянов, Г.Н. Консалтинг при автоматизации предприятий: подходы, методы, средства. [Электронный ресурс]: учебное пособие. – Режим доступа: <http://www.interface.ru>, свободный.
4. Ломазова, И.А. Вложенные сети Петри и моделирование распределенных систем / И.А. Ломазова // Программные системы: теория и приложения. – 2004. – С. 337–352.
5. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. / Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
6. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов – 5-е изд., стер. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая Школа, 2007. – 343 с.

**Рыбников К.К., Колесин К.О. СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЕВ И СОЗДАНИЕ ФАКУЛЬТЕТА ЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМОТЕХНИКИ. РЕОРГАНИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ В МЛТИ.**

Целью работы является краткое освещение страниц истории создания факультета электроники и счетно-решающей техники (ныне электроники и системотехники) как мощной базы подготовки инженеров космической отрасли, владеющих современным математическим аппаратом. Рассказывается о личном вкладе Генерального конструктора космической отрасли С.П. Королева в создание факультета.

Ключевые слова: С.П. Королев, факультет электроники и системотехники МГУЛ.

**Ribnikov K.K. Kolesin K.O. SERGEI PAVLOVICH KOROLEV AND CREATION OF FACULTY OF ELECTRONICS AND SYSTEMS ENGINEERING.**

The goal of this article is a brief coverage of pages of history of creation of the Faculty of electronics and calculating enginery (now called the Faculty of electronics and systems engineering) as strong base for the training of engineers of space industry had a command of modern mathematical apparatus. This article carries information about personal contribution of S.P. Korolyov, General Constructor of space industry, to creation of faculty.

Key words: S.P. Korolev, Faculty of electronics and System engineering MSFU.

**Билалов Р.А., Григорьев В.А., Павлов А.Е., Попов А.Ю., Свириденко, Ю.Н. Селецкая Э.С. ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР НАСТРОЙКИ И КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ.**

Унифицированная система позиционирования (УФСП) предназначена для определения положения объекта относительно горизонта или углового перемещения объекта относительно заданного положения. Пакет программ предназначен для проверки работоспособности унифицированной системы позиционирования, калибровки прибора, определения коэффициентов температурной чувствительности и графического отображения информации.

Ключевые слова: унифицированная система позиционирования, пакет программ, калибровка прибора.

**Bilalov R.A., Grigorev V.A., Pavlov A.E., Popov A.J., Sviridenko J.N., Seletskaya E.S. SOFTWARE PACKAGE SHOWING OF VERIFICATION, AUTOMATION SETTINGS AND CONTROL POSITION SYSTEM.**

Unified position system designed (UPS) for determination of object position in relation to horizon and its angular displacement in relation to assign position. Software package created for verification of UPS's working capacity, device's calibration, estimation temperature sensitivity factor and graphic model display.

Key words: unified position system, software, device's calibration.

**Костылев А.Г. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ.**

В статье рассматриваются вопросы подавления помех на изображениях с использованием линейных и нелинейных фильтров. Исследование процесса фильтрации осуществляется на тестовом изображении, искаженном равномерным мультипликативным шумом. Производится оценка эффективности девяти типов фильтров на основе четырех критериев. Для каждого типа фильтра задается по четыре набора входных настроечных параметров. Показана работа лучшего из анализируемых фильтров на примере обработки радиолокационного изображения земной поверхности.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, шум, фильтр, оценка эффективности.

**Kostilev A.G. FILTERS EFFICIENCY ESTIMATION IN TASKS OF IMAGE PROCESSING IN THE CONDITIONS OF NOISE.**

The article deals with the noise suppression on the images using of linear and nonlinear filters. It implements research of filtering process using the test image distorted by uniform multiplicative noise. The filters of nine types are estimated by four efficiency criteria. Each type of filter is specified with the four sets



of input adjustment parameters. The performance of the best from studied filters is shown by the example of processing the radar image of earth surface.

Key words: Radar Image, Noise, Filter, Efficiency Estimation.

**Полещук О.М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЙТИНГОВЫХ ОЦЕНОК ОБЪЕКТОВ С КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.**

Работа представляет метод определения рейтинговых оценок с качественными характеристиками. Новизна этого метода состоит в том, что автор использует лингвистические шкалы, что позволяет формализовать значения характеристик с помощью теории нечетких множеств. Как результат появляется возможность корректно оперировать с различными характеристиками на едином универсальном пространстве и получать устойчивые конечные результаты. Полученные рейтинговые оценки предлагается использовать в задачах принятия решений на основе экспертных мнений.

Ключевые слова: мониторинг информации, нечеткая логика, рейтинговые оценки.

**Poleshuk O.M. ASSESS TO RATING POINTS WITH QUALITATIVE INDEXES AND ITS USE IN TASKS OF DECISION MAKING.**

The paper presents the method developed to assess rating points of objects with qualitative indexes. The novelty of the method lies in the fact that the author use linguistic scales that allow to formalize the values of the indexes with the help of fuzzy sets. As a result it is possible to operate correctly with dissimilar indexes on the unified basis and to get stable final results. The obtained rating points are used in decision making based on fuzzy expert opinions.

Key words: monitoring of information, fuzzy logic, rating points.

**Галкин Ю.С., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Потапов В.Н., Семенова В.П., Эсаналиев Ч.Д. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ БИОМЕТРИЧЕСКИХ И ПРОДУКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОСТИ.**

В статье представлены результаты разработки программных модулей для автоматизированного определения биометрических и продукционных характеристик растительности по данным космического мониторинга. Результаты подтверждаются наземными измерениями.

Ключевые слова: биометрические характеристики растительности, продукционные характеристики растительности, космический мониторинг.

**Galkin U.S., Shalaev V.S., Batyrev U.P., Potapov V.N., Semenova V.P., Esenaliev Ch.D. THE DEFINITION OF VEGETATION BIOMETRIC AND PRODUCTION PARAMETERS BY SPACE IMAGES.**

The elaborated software results by automatic definition of vegetation biometric and production parameters are described in the paper. The results are confirmed by the ground measurements.

Key words: biometric parameters of vegetation, production parameters of vegetation, space monitoring.

**Ачильдиев В.М., Воробушкин В.В., Есаков В.А., Иванов Н.М., Домрачев В.Г., Наумов А.Н. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО МИКРОАППАРАТА.**

Рассматривается возможность создания интегрированной системы управления движением и навигацией для винтокрылых летательных микроаппаратов на основе микродатчиков. Показываются особенности построения и результаты разработки подобных систем.

Ключевые слова: интегрированная система, микроаппарат, навигация.

**Achildiev V.M., Vorobushkin V.V., Esakov V.A., Ivanov N.M., Domrachev V.G., Naumov A.N. THE INTEGRATED CONTROL SYSTEM OF MOVEMENT AND NAVIGATION OF THE MICROMECHANICAL UNMANNED AIR VEHICLE.**

The paper investigates the possibility to develop integrated control and navigation system for micromechanical unmanned air vehicle. Various designs of these systems and results of their development are presented.

Key words: integrated system, micromechanical unmanned air vehicle, navigation.

### **Бедро Н.А. СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ.**

Испытания на воздействие вибрационных и ударных нагрузок проводятся с помощью различных виброударных стендов, в то время как для точностных параметров и для проведения ресурсных испытаний используются вращательные стенды. В настоящей статье рассматривается возможность совмещения всех видов испытаний с использованием одного лишь вращательного стенда AC 1120S V2.3 [5]. Такой подход позволяет сократить количество оборудования при сертификации микромеханических акселерометров и систем позиционирования на их основе.

Ключевые слова: сертификация, микромеханические акселерометры, вибрационные нагрузки.

### **Bedro N.A. CERTIFICATION STATION-KEEPING EQUIPMENT ON BASIS OF MICRO-MECHANICAL ACCELEROMETERS.**

Trials for effect vibrational and shock loads are conducted by means of different vibroimpact benches while for accuracy parameters and for realization of service life tests rotational benches use. In the present article the capability of overlapping of all kinds of trials with usage of only one rotational bench AC 1120S V2.3 [5] is observed. Such approach allows to divide out quantity of the equipment at a type certification of micromechanical accelerometers and station-keeping equipments on their basis.

Key words: certification, micromechanical accelerometers, vibrational loads.

### **Воробушкин В.В. МОДАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО МИКРОАППАРАТА.**

В статье приведено описание уравнений линейной модели углового движения микроаппарата и результаты анализа полной управляемости объекта и синтеза необходимого регулятора. Материалы статьи содержат уравнения на основе фильтров Калмана для определения корректирующих поправок в сигналы управления по информации навигационной системы. Рассмотрена методика оценки и экспериментального определения собственных частот и коэффициентов демпфирования ЛМА.

Ключевые слова: модальный синтез, летательный микроаппарат, алгоритм.

### **Vorobushkin V.V. MODAL SYNTHESIS OF CONTROL ALGORITHMS FOR MICRO AIR VEHICLE.**

The article describes modal control rules of a four-motors micro air vehicle are discussed. Linear model of angular movements of a micro air vehicle. Results of analysis of complete sensitivity of an object and synthesis of the required regulator are presented. Equations based on Kalman's filtration for definition of corrections of control signals based on the navigation system data are presented. Methodology of evaluation and experimental determination of natural frequencies and damping coefficients of a micro air vehicle is discussed.

Key words: modal synthesis, micro air vehicle, algorithm.

### **Песельник М.Г. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.**

В статье рассматривается система автоматического управления скоростью транспортного средства, позволяющая значительно улучшить эксплуатационные свойства автомобиля, такие как удобство, безопасность, экономия топлива, ограничение максимальной скорости движения и др.

Ключевые слова: скорость движения, круиз-контроль, электронная система управления.

### **Peselnik M.G. AUTOMATIC VEHICLE SPEED CONTROL SYSTEM.**

This article considers an automatic vehicle speed control system that enables to improve significantly vehicle performance – such as drivability, safety, fuel economy, maximum vehicle speed limiter and others.

Key words: vehicle speed, cruise control, electronic control system.

### **Рязанов С.С. СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР.**

Рассмотрен способ измерения углового положения относительно местного горизонта и линейного ускорения, а также конструкция системы позиционирования для оптико-электронных систем на

основе микроэлектромеханических структур. Приведен анализ результатов предварительных испытательных макетов системы позиционирования.

Ключевые слова: системы позиционирования, оптико-электронные системы, микроэлектромеханические структуры.

**Ryazanov S.S. POSITION SYSTEMS FOR OPTOELECTRONIC DEVICES ON BASIS OF MICROELECTROMECHANICAL STRUCTURE.**

The methods dimension angular position relative to the local horizon and linear acceleration giving here, as well as the construction of position systems for optoelectronic devices on basis of microelectromechanical structure. The analysis of results a preliminary test the model of position systems were giving.

Key words: position systems, optoelectronic devices, microelectromechanical structure.

**Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Поздняков В.В., Левкович А.Д. СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ.**

Рассмотрены вопросы применения бесплатформенных инерциальных блоков, магнитометра, альтиметра, микроконтроллера, приемника GPS/Глонасс и лазерного дальномера для синтеза новых типов оптико-электронных приборов наблюдения и ориентации, приводятся их структурные схемы. Выводятся формулы для расчета координат удаленного объекта. Приводятся результаты испытания макетов, в которых были оценены накопленные ошибки, а также среднее квадратическое отклонение по углам крена, тангажа и магнитного курса микромеханической бесплатформенной магнито-инерциальной системы ориентации.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, GPS, магнито-инерциальная система ориентации.

**Soldatenkov V.A., Grusevich U.K., Achildiev V.M., Posdnykov V.V., Levkovich A.D. SYSTEMS OF POSITIONING FOR OPTOELECTRONIC DEVICES FOR OBSERVING AND NAVIGATION.**

The matters of using a strapdown inertial cluster, a magnetometer, an altimeter, a microcontroller, a GPS receiver, and a laser rangefinder for synthesis of a new type of optoelectronic devices for measuring the geographical coordinates of the distant object are treated. The structure chart of such system is shown, formulas for measuring of the geographical coordinates of the distant object are derived. Estimations of accumulated errors and root-mean-square deviation taken from prototype of micromechanical strapdown magneto-inertial orientational system for roll, pitch and magnetic course angles are obtained.

Key words: optoelectronic devices, GPS, magneto-inertial orientational system.

**Борисов А.А. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.**

Приведены результаты синергетического моделирования инновационных процессов применительно к оценке ситуации в электронной отрасли и выработке стратегии программного развития электронной компонентной базы специального назначения, даны прикладные аспекты применения синергетического моделирования по формированию перспективного технического облика изделий субмикронной микроэлектроники.

Ключевые слова: микроэлектроника, электронная промышленность, субмикронная микроэлектроника.

**Borisov A.A. THE GROUNDS OF THE SPECIAL MICROELECTRONIC DEVELOPMENT DIRECTIONS BASED ON THE COMBINED MODELING OF THE INNOVATION PROCESSES IN THE NATIVE ELECTRONIC INDUSTRY.**

The results of the combined innovation processes modeling applied to the situation estimate in the electronic branch and the strategy generation of the special program electronic component base development are presented. The applied aspects of the combined modeling application of the perspective technical face of the submicron microelectronics products.

Key words: microelectronic, electronic industry, submicron microelectronics.

**Борисов А.А. К ВОПРОСУ О ПРОЦЕССНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.**

Рассмотрены принципы структуризации различных поколений электронной компонентной базы. Приведены основные элементы процессно-логистического подхода к решению проблемы управления развитием электронной компонентной базы специального (военного) назначения и даны предложения по формированию концепции программ создания электронной компонентной базы нового (пятого) поколения.

Ключевые слова: процессно-логистическая модель, электронная компонентная база.

**Borisov A.A. FOR THE QUESTION OF THE PROCESS-LOGISTICAL MODEL OF THE SPECIAL ELECTRONIC COMPONENT BASE DEVELOPMENT.**

The structurization principles of the different generation electronic component base are considered. The general elements of the process – logistical approach to the control problem solution of the special electronic component base development are presented. The proposals on the formation of the program concepts of a new (fifth) generation electronic component base are given.

Key words: process-logistical model, electronic component base.

**Пушкарский С.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ИСПЫТАНИЙ ПОДСИСТЕМ МФКС ПРИ ИЗВЕСТНЫХ ФУНКЦИЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ.**

В статье изложена теория оптимизации количества испытаний подсистем многофункциональной космической системы в координатах точность – стоимость. Обоснованы допущения, дающие аналитическое решение задачи.

Ключевые слова: многофункциональная космическая система, оптимизация параметров.

**Pushkarsky S.V. THE OPTIMIZATION OF NUMBER OF THE MFSS SUB-SYSTEMS TRIALS ON THE KNOWN DISTRIBUTION FUNCTIONS OF INTRANCE DATA.**

The paper describes the theory of number optimization of trials of the multifunction space system sub-systems in accuracy – cost coordinates. There are grounded approximations which allow to obtain analytic decision of the problem in the paper.

Key words: multifunction space system, parameter optimization.

**Батырев Ю.П., Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Царьгородцев Ю.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ОБЪЕКТА НА ВЫХОДНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА.**

Показано влияние проводимости объекта на выходную характеристику вихретокового датчика. Приведена схема интеллектуального вихретокового преобразователя.

Ключевые слова: вихретоковой датчик, проводимость, интеллектуальный преобразователь.

**Batyrev J.P., Poluektov N.P., Harchenko V.N, Tsargorodtsev J.P. RESEARCH OF INFLUENCE OF CONDUCTIVITY OF OBJECT ON THE TARGET CHARACTERISTIC EDDY CURRENT SENSOR.**

Influence of conductivity of object on the target characteristic eddy current sensor is shown. The scheme intellectual eddy current converter is resulted.

Key words: eddy current sensor, conductivity, the intellectual converter.

**Беляев Б.Б. ОЦЕНКА УХОДОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ГИРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ТОЧНОСТИ ПРИВЯЗКИ ЕЕ К ИНЕРЦИАЛЬНОМУ ПРОСТРАНСТВУ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АСТРОДАТЧИКОВ.**

Разработана методика и получены расчетные соотношения, позволяющие на борту КА по измерениям астродатчиков определять с заданной точностью уходы бесплатформенной гироскопической системы и осуществлять привязку этой системы к инерциальному пространству с точностью, превышающей точность измерений астродатчиков.

Ключевые слова: астродатчик, измерения, система.



**Belyaev B.B. SPACECRAFT INERTIAL ATTITUDE REFERENCE UNITS COMPOSED OF A SET OF GYROSCOPES DRIFTS AND ACCURACY ESTIMATION AND ITS COLLABORATION TO INERTIAL SPACE BASED ON STAR SENSORS MEASUREMENTS.**

This paper describes the implementation of gyros and star sensors measurements treatment method for estimation of gyros drift with required accuracy. This method provides collaboration of the gyro system to inertial space with accuracy higher to be compared star sensors accuracy.

Key words: star sensors, measurements, system.

**Беляев Б.Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМА СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.**

Показана возможность определения начальных скоростей вращения 4-х двигателей-маховиков (ДМ), создающих управляющие моменты, действующие на космический аппарат (КА), находящийся в режиме стабилизации своего углового положения. Получены расчетные формулы, связывающие установившиеся скорости отдельных маховиков с начальным суммарным кинетическим моментом системы ДМ для случая их пирамидальной компоновки на корпусе КА.

Ключевые слова: космический аппарат, пирамидальная компоновка.

**Belyaev B.B. DEFINITION OF REACTION WHEELS SYSTEM INITIAL CONDITION FOR RESEARCHING OF SPACECRAFT ATTITUDE STABILIZATION MODE.**

The possibility of definition initial rates of 4 reaction wheels is demonstrated for spacecraft attitude stabilization mode. Analytical formalization of stable rates reaction wheels with initial momentum of reaction wheels system for pyramidal mounting at spacecraft structure.

Key words: spacecraft, pyramidal mounting.

**Бурков В.Д., Крапивин В.Ф., Шалаев В.С., Бородин Л.Ф., Миронов А.С. МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ.**

Обсуждается задача раннего обнаружения очагов возможного загорания леса и лесо-болотного комплекса. Предлагается эффективная технология дистанционного обнаружения очагов загорания с помощью методов микроволновой радиометрии. Приводятся экспериментальные данные.

Ключевые слова: микроволновая технология, лесные и торфяные пожары, диагностика.

**Burkov V.D., Krapivin V.F., Shalaev V.S., Borodin L.F., Mironov A.S. MICROWAVE TECHNOLOGY FOR THE DIAGNOSTICS OF THE FOREST AND PEAT FIRES.**

The problem of earlier detection of the origins of possible fires in forests and forest-marshes complexes is discussed. Effective technology is proposed to be used under the remote detection of the heat sources by means of the methods of microwave radiometry. Experimental data are given.

Key words: microwave technology, the forest and peat fires, diagnostics.

**Бурков В.Д., Капранов Ю.С., Перминов С.В., Харитонов Н.А. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ.**

Рассмотрены условия воздействия факторов космического пространства (ФКП) на работоспособность волоконно-оптических приборов и элементов систем передачи информации на борту космических аппаратов (КА) для различных орбит и сроков активного существования КА. Выполнен сравнительный анализ работоспособности элементов бортовых волоконно-оптических систем передачи информации как для традиционных волоконных световодов, так и для волоконных световодов на основе наноструктурированных оптических световодов. Предложены средства и методы повышения стойкости волоконных элементов бортовых систем передачи информации при длительных сроках активного существования космических аппаратов.

Ключевые слова: факторы космического пространства, световоды, оптические волокна, космические аппараты.

**Burkov V.D., Kapranjv J.S., Perminov S.V., Haritonov N.A. APPLICATION OF MODERN FIBRE OPTICS FOR CONSTRUCTION OF FIBRE OPTICS NETWORKS AT THE PERSPECTIVE SPACE VEHICLES.**

The terms of influence of space (SF) factors are considered on the capacity of fiber optics elements of the systems of information transfer aboard space vehicles (SV) for different orbits and terms of active existence SV. The comparative analysis of capacity of elements of the side fibre optics systems of information transfer is executed, both for traditional fibre light-pipes and for optical light-pipes, executed on modern technologies. Possibility of application aboard SV of fibre optics systems highways is considered on the basis of the photonic crystal fiber micro-pattern and nano-pattern optical fibres.

Key words: space factors, light-pipes, fibre optics, space vehicles.

**Волынцев А.А., Казаков Б.А., Шустов И.Е. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ.**

В настоящее время в связи с усложнением задач, решаемых с использованием ракетно-космической техники, возрастают и требования, предъявляемые к точности и диапазону измерения угловых скоростей космических аппаратов. В данной работе с целью увеличения диапазона и повышения точности измерения предлагается: введение двухотсчетной системы измерения угловой скорости, введение второго контура в систему обратной связи измерительного канала, увеличение коэффициента передачи датчика момента гироскопа. Вышеперечисленные меры позволят увеличить диапазон измерения угловой скорости объекта управления с  $0,5^\circ/\text{с}$  до  $2,0^\circ/\text{с}$ , при этом уменьшив цену дискрета младшего разряда информации (масштабный коэффициент измерительного канала) с  $0,036$  дуг.с до  $0,005$  дуг.с.

Ключевые слова: гироскопические измерители, угловая скорость, ракетно-космическая техника.

**Volyntsev A.A., Kazakov B.A., Shustov I.E. INCREASING OF ACCURACY AND MEASURING RANGE OF GYROSCOPIC MEASURERS OF ANGULAR VELOCITY VECTOR.**

Today, in view of complication of tasks, which are solving by space-rocket engineering, also increasing demands, made to accuracy and measuring range of space vehicle's angular velocities. In present work to widen angular velocity measuring range and to increase accuracy of measurement is offered: inserting the double scale angular velocity measuring system, inserting the second loop in feedback system of measuring channel, increasing of torque motor's transfer constant in floating gyro. The aforementioned actions will allow to widen angular velocity measuring range of the control object from  $0,5^\circ/\text{sec}$  to  $2,00^\circ/\text{sec}$  and to decrease the information's low order unit (measuring channel's scale factor) from  $0,036$  sec. of arc to  $0,005$  sec. of arc.

Key words: gyroscopic measurers, angular velocity, space-rocket engineering.

**Пушкарский С.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ НА ВАХ ТРАНЗИСТОРОВ МОП.**

Проведены экспериментальные исследования воздействия радиации на вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП), которые являются основными полупроводниковыми элементами приборов космических аппаратов.

Ключевые слова: МОП транзисторы, вольт-амперные характеристики, радиация.

**Pushkarsky S.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF RADIATION EFFECT ON VCC OF MOS TRANSISTORS.**

Experimental studies of radiation effect on voltage – current characteristic (VCC) of transistors with structure metal – oxide-semiconductor (MOS) are carried out. These transistors are the basic semi-conductor elements of space vehicles devices.

Key words: MOS transistors, voltage – current characteristic, radiation.

**Чернышов А.В. СИСТЕМА ИМИТАЦИИ ДАТЧИКОВ РАБОЧЕГО МЕСТА КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ.**

Рассмотрена задача подготовки данных для управляемых имитаторов сигналов датчиков, применяемых в составе рабочего места контроля для испытаний бортовой телеметрической аппаратуры

«Орбита-IVМО». Показано, что наиболее эффективным способом решения задачи является разработка языков, описывающих имитируемые уровни каналов в терминах предметной области, реализованных трансляторами и дополненных декодерами из бинарной в исходную форму. Описана практическая реализация языка для имитатора аналоговых датчиков.

Ключевые слова: система имитации датчиков, телеметрическая аппаратура, рабочее место.

**Chernyshov A.V. SENSORS IMITATION SYSTEM OF TEST WORKPLACE OF ONBOARD TELEMETRY EQUIPMENT.**

Data preparation task for controllable signal sensors imitators considered. This imitators apply in telemetry onboard equipment «Orbita-IVMO» test workplace. The most effective decision method is language development that imitation signals in application domain described. Compilers and decoders development needed. Example language for analog signal sensors imitator described.

Key words: sensors imitation system, telemetry equipment, workplace.

**Серебренников П.С. ОБ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК.**

Для модели квантовой точки (КТ) в виде таблетки в приближении эффективной массы проведен численный расчет энергетического спектра дырок. Использованы численные константы гетероструктуры Ge-Si. Учтено различие эффективных масс дырок в нанокластере и матрице и затухающие части волновой функции. В дипольном приближении получено выражение для матричного элемента фотоионизации КТ при поглощении ИК фотона. Рассмотрены случаи электрического вектора волны вдоль и поперек оси таблетки. Получена значительная разница в величине матричного элемента для этих случаев.

Ключевые слова: квантовая точка, энергетический спектр, фотоионизация, матричный элемент.

**Serebrennikov P.S. ABOUT OPTICAL PROPERTIES OF QUANTUM DOTS.**

For a model of quantum dot (QD) as a tablet numerical calculation of hole energy spectrum is carried out. Numerical constants of Ge-Si heterostructure are used. Difference of hole effective mass in nanocluster and a matrix and decaying parts of a wave function are taken into account. In dipole approximation expression for a matrix element of QD photoionization by IR quantum is received. Cases of a wave electric vector along and perpendicular of a tablet axes are studied. The significant difference values of a matrix elements for these cases is received.

Key words: quantum dot, energy spectrum, photoionization, matrix element.

**Шульц А.Н., Харченко В.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ БОРТОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.**

Использование запуска тепловых труб (ТТ) для обеспечения эффективного теплообмена позволяет решать задачи управления и стабилизации температурных режимов элементов бортовых энергетических систем (БЭС). Способность ТТ трансформировать тепловые потоки от высоких удельных значений к низким дает возможность использовать их в качестве элементов тепловой защиты конструкций летательных аппаратов. Применение жидкометаллических ТТ значительно расширяет область решаемых задач. Однако при этом возникает необходимость обеспечить их надежный запуск из замороженного состояния теплоносителя. Этой проблеме и посвящена данная работа.

Ключевые слова: жидкометаллические тепловые трубы, бортовые энергетические системы.

**Shults A.N., Kharchenko V.N. START RESEFRCH OF LIQUID METAL HEAT PIPES FOR ONBOARD POWER DEVICES.**

Use of HP for effective heat exchange allows to solve problems of temperature management and stabilization in onboard power devices elements. The ability of HP to transform thermal streams from high specific values to low enables to use them for thermal protection of flying devices construction. Application liquid metal HP considerably expands area of solved problems. However there is a necessity to provide their reliable start from the frozen condition of the heat-carrier. The given work is devoted to this problem.

Key words: liquid metal heat pipes, onboard power devices.

**Зверев Н.В. НЕЛОКАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ДИСКРЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ.**

Рассмотрены две нелокальные модели фермионов со вспомогательными частицами в дискретном пространстве-времени: векторная и киральная модели. Векторная модель согласуется с непрерывной теорией в однородном внешнем поле. Киральная модель не согласуется с непрерывной теорией в однородном внешнем поле, но согласуется в неоднородном поле.

Ключевые слова: нелокальные модели фермионов, модели частиц в дискретном пространстве-времени.

**Zverev N.V. NON-LOCAL MODELS OF ELEMENTARY PARTICLES IN THE DISCRETE SPACE-TIME.**

Two non-local models of fermions with auxiliary particles in the discrete space-time, namely, the vectoral and the chiral models, are considered. The vectoral model agrees with continuum theory in the external uniform field. The chiral model does not agree with continuum theory in the external uniform field but agrees in the non-uniform field.

Key words: non-local models of fermions, models of elementary particles in the discrete space-time.

**Рыбников К.К., Ласковая Т.А. К ВОПРОСУ О ВКЛЮЧЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИСТОРИИ МАТЕМАТИКИ В КАЧЕСТВЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ СОСТАВНОЙ ЧАСТИ В МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЛЕКЦИОННЫЕ КУРСЫ.**

В статье рассматривается вопрос о возможности включения историко-математических иллюстраций в программу лекционных курсов по основным математическим дисциплинам для студентов различных специальностей, основанных на страницах истории их учебного заведения, на примере МГУЛ.

Ключевые слова: историко-математические иллюстрации, МГУЛ.

**Ribnikov K.K., Laskovaya T.A. ABOUT QUESTION OF INCLUSION OF ELEMENTS OF HISTORY OF MATHEMATICS AS AN ORGANIC PART IN MATHEMATICAL COURSES.**

This article deals with question about possibility of inclusion of historical-mathematical illustrations in a course of lectures on basic mathematical disciplines for students of different specialities based on pages of history of their school by example of MSFU.

Key words: historical-mathematical illustrations, MSFU.

**Марковский А.Д. ОТКРЫТИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЧИСЕЛ, ИХ ЗНАЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ.**

Перечисляются открытия, послужившие основой трех новых научных направлений «Теории машинных арифметик», «Мультипликативному методу цифровых вычислений» и «Непрерывным кодированиям чисел, ограничивающих перенос». Характеризуется их значение и перспективы.

Ключевые слова: машинные арифметики, мультипликативные алгоритмы, непрерывные кодирования.

**Markovski A.D. THE DISCOVERIES, APPLY TO PRESENTATION OF NUMBERS, THEIR IMPORTANCE AND PERSPECTIVE.**

Enumerating openings, that serving the base of their new scientific courses: «The theory of machine arithmetic», «Multiply mode of digital calculations» and «ceaseless coding of numbers that limit the transfer». Charactering their meaning and aspects.

Key words: machine arithmetics, multiplicative mode of digital calculation, ceaseless coding.

**Сигалов И.Е., Урошлев Л.А. О СМЕШАННОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА КВАЗИПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ.**

В статье рассматривается квазипараболическое уравнение. Для данного уравнения находится полупространственное решение и строится разностная схема. Также для приводится программа, выполняющая расчет по данной разностной схеме.

Ключевые слова: квазипараболическое уравнение, разностная схема.



**Sigalov I.E., Uroshlev L.A. ABOUT THE MIXED PROBLEM FOR ONE CLASS OF THE QUASIPARABOLIC EQUATIONS.**

The quasiparabolic equation is considered in this article. We find a subspace solution for this equation and build a subtractive scheme. Also there is the program executing a calculation by this subtractive scheme.

Key words: quasiparabolic equation, subtractive scheme.

**Сусов Р.В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА «ПРИВЛЕЧЕНИЕ КЛИЕНТА».**

В данной статье исследованы методы оптимизации бизнес-процессов с применением имитационного моделирования на примере типового процесса торговой компании «Привлечение клиента». Проведенное исследование позволило выработать рекомендации для оптимизации процесса «Привлечение клиента» и внедрить наиболее эффективный и менее затратный вариант реализации процесса в торговой компании.

Ключевые слова: оптимизация, бизнес-процесс, «привлечение клиента».

**Susov R.V. IMPLEMENTATION OF SIMULATION METHODS FOR OPTIMIZATION BUSINESS-PROCESS OF «CUSTOMER ACQUISITION».**

In this article an author has researched business-process optimization methods with implementation of simulation via a concrete example of «Customer acquisition» process in trading company. This research has made possible to work out recommendations for «Customer acquisition» process optimization and put into practice the most effective and low-cost process implementation alternative in trading company.

Key words: optimization, business-process, «customer acquisition».

**Трегуб А.В. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАЛОГОВЫХ СТАВОК.**

В настоящей работе изучается вопрос о влиянии государственного налогообложения на деятельность предприятия. Рассматривается задача максимизации прибыли предприятия в зависимости от изменяющегося акцизного налога. На примере статистических данных проводится анализ деятельности правительства по поддержке отечественных экспортеров нефти. Исследуется влияние мировых цен на нефть на размер таможенных пошлин.

Ключевые слова: задача максимизации прибыли, математическая модель работы предприятия.

**Tregub A.V. PLOTTING THE MATHEMATICAL MODEL OF WORK AN ENTERPRISE IN CASE OF CHANGING TAXES.**

In this article we look into a question about influence of state taxation over activity of an enterprise. We consider the task about maximization of profit of enterprise depending on the changing excise tax. Analysis of government's activity of support of home oil exporters is done by example of statistical data. We analyse influence of the global oil prices over size of the customs.

Key words: mathematical model of work an enterprise, task about maximization of profit.

**Урошлев Л.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ.**

В работе рассматривается уравнение Эйлера-Бернулли, где коэффициенты предполагаются произвольными разрывными функциями. Сформулированы условия существования и единственности.

Ключевые слова: уравнение Эйлера-Бернулли с разрывными коэффициентами, граничная задача, теорема существования и единственности.

**Uroshlev L.A. RESEARCH ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATION WITH DISCONTINUOUS COEFFICIENTS.**

This article deals with Euler-Bernoulli equation, where coefficients are presupposed to be random discontinuous functions. Conditions existence and uniqueness are formulated.

Key words: Euler-Bernoulli equation with discontinuous coefficients, boundary task, existence and uniqueness theorem.

**Уткин Г.С., Башарин А. П. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ.**

В статье описываются подходы для построения репрезентативной модели нагрузочного тестирования.

Ключевые слова: тестирование программного обеспечения, нагрузочное.

**Utkin G.S., Basharin A.P. METHODS CONSTRUCTION OF MODEL OF LOADING TESTING.**

In article approaches for construction of representative model of loading testing.

Key words: software testing, load.

**Шмаков А.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСХОДЯЩЕЙСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПОЛИНОМЫ ЧЕБЫШЕВА.**

Рассмотрена плоская, нестационарная задача гидродинамики идеальной сжимаемой жидкости. Получено аналитическое решение в виде интегральных уравнений Вольтерра первого рода. Ядра интегральных уравнений представлены через полиномы Чебышева.

Ключевые слова: гидродинамика, полиномы Чебышева.

**Shmakov A.V. DETERMINATION OF THE DIVERGENT CYLINDRICAL WAVES THROUGH CHEBYSHEV POLYNOMIALS.**

A flat, non stationary, ideal compressible hydrodynamics problem zhidkosti. Received analytic solution in the form of Volterra integral equations First roda. Yadra integral equations are presented via Chebyshev polynomials.

Key words: hydrodynamics, Chebyshev polynomials.

**Малиновский И.А. ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ПРЕДЛОЖЕНИЯ НА РЫНКЕ ИТ-АУТСОРСИНГА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СХОДСТВА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КОМПАНИЙ-ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.**

В работе описаны подходы к формированию предложения на рынке ИТ-аутсорсинга на основе оценки сходства бизнес-процессов компаний-потребителей и то, как они могут быть использованы для обнаружения тенденций на рынке и формирования предложения на основе схожих фрагментов.

Ключевые слова: бизнес-процессы, аутсорсинг, рыночное предложение.

**Malinovskiy I.A. APPROACHES TO IT-OUTSOURCING MARKET PROPOSITION DEVELOPMENT BASED ON SIMILARITY ESTIMATION OF COMPANIES BUSINESS PROCESSES.**

This paper describes proposition development approaches for IT-outsourcing market based on similarity estimation of companies' business processes. It gives examples of how they could be applied to discovering trends in the market and proposition development based on found similar processes or sub processes.

Key words: business processes, outsourcing, market proposition.

**Афонин Д.Б. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АБОНЕНТОВ В ГОРОДСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ.**

В статье рассмотрены некоторые распространенные технологии идентификации абонентов в городских сетях (т. н. Metro Ethernet), их основные достоинства и недостатки. Предложена оригинальная технология идентификации абонентов в городских сетях, основанных на технологии Ethernet, позволяющая существенно сократить финансовые вложения в дорогостоящее оборудование, что весьма актуально в условиях мирового финансового кризиса.

Ключевые слова: городские компьютерные сети, абоненты, современные технологии, Ethernet.

**Afonin D.B. MODERN TECHNOLOGIES OF SUBSCRIBERS IDENTIFICATION IN CITY NETWORKS.**

The article analyses some widespread technologies of subscribers identification in city networks (so-called Metro Ethernet), their basic merits and demerits. The original technology of identification of subscribers in the city networks is offered. This technology allowing essentially to reduce financial investments in the expensive equipment that is rather actual in the conditions of world financial crisis.

Key words: city networks, subscribers, modern technologies, ethernet.

**Волков А.С. МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ И СЖАТИЯ ИНТЕРАКТИВНОГО ВИДЕО В ВИДЕОПОТОКЕ: МЕТОД МАСОК И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ.**

В статье рассматривается задача организации и сжатия интерактивного видео в видеопотоке как одна из составляющих проблемы реализации интерактивного видео. Рассмотрен метод масок и пользовательских данных. Показана структура организации видеопотока с примерами и иллюстрациями кадров видео и масок. Сделаны выводы о значимости метода в среде теле-видеовещания.

Ключевые слова: видео, изображение, видеопоток, интерактивность, MPEG4, альфа-маска.

**Volkov A.S. METHODS OF ORGANIZATION AND INTERACTIVE VIDEO COMPRESSION IN video STREAM: METHOD OF mask AND USER'S DATA.**

In this article the task of the organisation and compression of interactive video in a video stream, as one of components of a problem of implementation of interactive video is considered. The method of masks and the user's data is considered. The structure of the organisation of a video stream with examples and illustrations of frames of video and masks is shown. Conclusions are made on the significance of a method in the tele- and video broadcasting.

Key words: video, image, video stream, interactivity, MPEG4, alpha-mask.

**Дмитриев А.Н. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ.**

В статье рассмотрены методы моделирования и оценки эффективности сетей информационного обмена распределенных объектов. Для повышения эффективности функционирования сетей информационного обмена распределенных объектов предложено использовать методы искусственного интеллекта (экспертные системы) при реализации функций управления сетями.

Ключевые слова: сети информационного обмена, управление, искусственный интеллект.

**Dmitryev A.N. THE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES IN REALIZATION OF CONTROL FUNCTIONS OF DATA COMMUNICATION NETWORKS OF THE DISTRIBUTED OBJECTS IN THE INTERESTS OF THEIR EFFICIENCY IMPROVEMENT.**

In this paper procedures for modeling and performance evaluating of data communication networks of the distributed objects are considered. To improve the efficiency of data communication networks of the distributed objects some artificial intelligence techniques (expert systems) were proposed in realization of network control functions.

Key words: data communication networks, control, artificial intelligence.

**Рубинштейн А.И. О КОЛЕБЛЕМОСТИ ФУНКЦИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ.**

Установлен критерий показателя колеблемости функции, определенной на конечном множестве точек.

Ключевые слова: критерий, показатель колеблемости, конечное множество.

**Rubinshtein A.I. ABOUT VARIATION OF FUNCTION DEFINED ON FINITE SET.**

The criterion for indicator of variation of function defined on finite set of points is set.

Key words: criterion, indicator of variation, finite set.

**Рыбников К.К. МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙРОСЕТЕЙ КАК ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ АНАЛИЗА УНИВЕРСАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ.**

Целью работы является анализ связей методов решения систем булевых уравнений, теории многогранников и прикладных задач, относящихся к изучению комплексов узлов электронных схем и нейросистем.

Ключевые слова: булевы уравнения, теория многогранников, нейросистемы.

**Ribnikov K.K. METHODS OF SETTING OF NEWRONETS' SYSTEM AS AN APPROACH TO SOLUTION TO PROBLEMS OF ANALYSIS OF UNIVERSAL MODELS OF ELECTRIC SCHEMES.**

The goal of this article is the analysis of connections of methods for solving systems of Boolean equations, polyhedral theory and applied tasks related to study of complexes of knots of circuits and neurosystems.

Key words: Boolean equations, polyhedral theory, neurosystems.

**Сухорученков Д.В. ИНТЕГРАЦИЯ НЕОДНОРОДНЫХ БАЗ ДАННЫХ С МЕНЯЮЩИМИСЯ СВЯЗЯМИ СУЩНОСТЕЙ.**

В работе показано, что возможность хранения непредвиденных связей и данных в информационных системах является проблемой. Ее нельзя разрешить, используя законы нормализации. Центральная ассоциативная сущность является ключом решения данной проблемы.

Ключевые слова: базы данных, информационные системы, законы нормализации.

**Sukhoruchenkov D.V. INTEGRATIO INHOMOGENEITY DATABASES RELATIONS CHANGING NATURE.**

It is shown that the possibility of unforeseen communication and storage of data in information systems is a problem. It can not be resolved using the laws of the normalization. Central associative entity – is the key solution to this problem.

Key words: databases, information systems, the laws of the normalization.

**Чернышов А.В. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ XML.**

Рассмотрена проблема формирования и накопления протоколов результатов испытаний бортовой телеметрической аппаратуры. Показано, что наиболее удобное решение заключается в применении для этой цели технологии XML.

Ключевые слова: телеметрическая аппаратура, технология XML, протоколы.

**Chernyshov A.V. FORMING ONBOARD TELEMETRY EQUIPMENT TEST PROTOCOLS WITH XML TECHNOLOGY USING.**

Examined problem of creation and collection onboard telemetry equipment test protocols. Show that practical solving this problem consist in XML technology using.

Ключевые слова: telemetry equipment, XML technology, protocols.

**Якушев Р.С. ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ.**

В статье рассматриваются автоматизированные системы обработки данных и управления с точки зрения обеспечения в них безопасности информации, выявляются проблемные вопросы построения систем в защищенном исполнении. В качестве метода решения выявленных проблем используется теория сетей Петри.

Ключевые слова: безопасность информации, политика безопасности, сети Петри.

**Yakushev R.S. THE PROBLEMS OF INFORMATION PROTECTION IN AUTOMATED SYSTEMS FOR DATA PROCESSING AND MANAGEMENT.**

This article discusses the automated system of data processing and management in terms of their information security, identify the issues of building secure systems design. As a method for solving the problems the theory of Petri's nets is used.

Key words: information security, information security policy, the Petri's nets.