

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

---



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

# **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**январь–февраль 2009**

**№ 1(59)**



## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,  
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Варганян,  
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин, д.т.н., профессор А.В. Демин,  
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),  
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,  
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,  
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,  
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,  
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин,  
д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина, д.т.н. О.А. Степанов,  
д.т.н., профессор В.Л. Ткалич, д.т.н., профессор А.А. Шалыто,  
д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь – Г.О. Котелкова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО

Телефон: (812) 233 12 70

Факс: (812) 232 02 95 (с пометкой: для редакции  
Научно-технического вестника)

[http: //books.ifmo.ru/ntv](http://books.ifmo.ru/ntv)

E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

---

Подписано к печати 10.02.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 7(59)

---

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи  
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.

Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать  
(газеты и журналы)

© Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики, 2009

<b>АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>5</b>
<b>Борисов П.А., Томасов В.С.</b> Методики анализа и синтеза энергоподсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями .....	5
<b>Герасимов Д.Н., Колюбин С.А., Никифоров В.О.</b> Адаптивное управление соотношением воздух–топливо и крутящим моментом в инжекторных двигателях внутреннего сгорания .....	14
<b>Никитина М.В., Осипов Д.В., Толмачев В.А.</b> Анализ устойчивости и синтез цифровых систем управления с импульсными усилительно-преобразовательными устройствами .....	21
<b>Мусалимов В.М., Дик О.Е., Тюрин А.Е.</b> Энергетические характеристики дискретного вейвлет-преобразования: применение к трибологическим и физиологическим сигналам.....	27
<b>Соснин В.В.</b> Исследование многоканальных систем массового обслуживания с эквивалентной производительностью .....	34
<b>Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В.</b> Использование многомассовых систем для повышения вибростойкости микромеханических гироскопов.....	40
<b>Гатчин Ю.А., Кузнецова О.А., Лобов В.В.</b> Оценка надежности структурно избыточных изделий при проектировании сложных технических систем .....	44
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>52</b>
<b>Свитенков А.И., Лесничий В.В., Чивилихин С.А., Гусаров В.В.</b> Морфология и динамика нанофазы.....	52
<b>Казначеева А.О.</b> Молекулярная визуализация в магнитно-резонансной томографии с помощью методики EPI-отображения.....	56
<b>Гераничев В.Н.</b> Повышение надежности паяных соединений в условиях термомеханических воздействий путем капсулирования матрицы шариковых выводов BGA корпусов .....	61
<b>МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.....</b>	<b>67</b>
<b>Арустамов С.А.</b> Восстановление доступности информационного обеспечения бизнес-процессов после катастроф.....	67
<b>Гирик А.В.</b> Организация мониторинга в телекоммуникационных сетях с целью обнаружения информационных угроз безопасности передачи данных .....	72
<b>Будько М.Б., Будько М.Ю.</b> Отслеживание изменений в структуре сети и решение задач повышения безопасности на основе анализа потоков данных .....	78
<b>Коробейников А.Г., Даурских А.Г., Павлова Н.В.</b> Встраивание цифровых водяных знаков в аудиосигнал методом расширения спектра .....	82
<b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>88</b>
<b>Богатырев В.А., Богатырев С.В.</b> Анализ готовности многоуровневой коммуникационной подсистемы компьютерных систем кластерной архитектуры.....	88
<b>Ключев А.О., Петров Е.В.</b> Система обновления программного обеспечения КТС Луч-2.....	94
<b>Ожиганов А.А., Чепурной А.И.</b> Классификация связей между частями веб-приложения и его описание с использованием модели конечных автоматов .....	100
<b>Тропченко А.Ю., Лужков Ю.В.</b> Сжатие изображений с потерями на основе адаптивной сегментации.....	106
<b>Арустамов С.А., Гатчин Ю.А., Романова Е.Б.</b> Анализ функциональных возможностей САПР P-CAD-2006 на основе опыта ее эксплуатации.....	114

<b>ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS.....</b>	<b>5</b>
<b>P. Borisov, V. Tomasov</b> Analysis and synthesis methods of electrotechnical complexes power subsystems with high power parameters .....	5
<b>D. Gerasimov, S. Kolyubin, V. Nikiforov</b> Adaptive air-to-fuel ratio and torque control of injector internal combustion engines .....	14
<b>M. Nikitina, D. Osipov, V. Tolmachov</b> stability analysis and synthesis of digital control systems with pulse power amplifying devices .....	21
<b>V. Musalimov, O. Dick, A. Tyurin</b> Energy characteristic of discrete wavelet transforms: application for tribological and physiological signals.....	27
<b>V. Sosnin</b> Characteristics of multi-channel queuing systems with equivalent throughput capacity.....	34
<b>M. Evstifeev, D. Rozentsvein</b> Multimass system application in micromechanical gyros for increase of resistance to vibration.....	40
<b>Yu. Gatchin, O. Kuznetsova, V. Lobov</b> Reliability evaluation of structurally redundant items during complex technical systems engineering .....	44
<b>MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES .....</b>	<b>52</b>
<b>A. Svitenkov, V. Lesnichiy, S. Chivilikhin, V. Gusarov</b> Morphology and dynamics of nanophase.....	52
<b>A. Kaznacheeva</b> Molecular visualization in magnetic-resonance tomography by echo-planar imaging techniques.....	56
<b>V. Geranichev</b> The increasing of solder joints reliability under thermomechanical stress by means of underfilling ball grid array of BGA packages .....	61
<b>INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS.....</b>	<b>67</b>
<b>S. Arustamov</b> Disaster recovery planning for business processes information and communication infrastructure.....	67
<b>A. Girik</b> Threats and anomalies detection using modern computer network monitoring techniques.....	72
<b>M. Bud'ko, M. Bud'ko</b> Tracing changes in network topology and security problems decision on the basis of the data flows analysis .....	78
<b>A. Korobeynikov, A. Dauriskikh, N. Pavlova</b> Integration of digital watermarks into audio signal using the method of spectrum expansion.....	82
<b>COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>88</b>
<b>V. Bogatyryev, S. Bogatyryev</b> Communication subsystem of computer systems with cluster architecture .....	88
<b>A. Klyuchev, E. Petrov</b> Update system of software LUCH-2 hardware.....	94
<b>A. Ozhiganov, A. Chepurnoy</b> Classification of connections between web application parts and web application modeling with the finite state machines.....	100
<b>A. Tropchenko, Yu. Luzhkov</b> Lossy image compression based on adaptive segmentation1 .....	06
<b>S. Arustamov, Yu. Gatchin, E. Romanova</b> P-CAD-2006 package functional analysis based on usage experience .....	114

УДК 621.314.333

## МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

П.А. Борисов, В.С. Томасов

Рассматриваются методики анализа и синтеза энергетических подсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями при одно- и двухстороннем энергопотреблении в зависимости от типа и свойств первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Поиск вариантов проекта проводится в процессе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта энергоподсистемы.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель напряжения, звено постоянного тока, неуправляемый выпрямитель, рекуперация, спектральный метод, широтно-импульсный преобразователь, электропривод постоянного тока, энергетическая подсистема, энергетические показатели.

### Введение

Широкое использование в современных электротехнических комплексах различного назначения регулируемых систем с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии требует дальнейшего совершенствования их энергетических подсистем (ЭП). ЭП включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового преобразователя, нагрузки и определяет массогабаритные и динамические показатели электротехнических комплексов и систем.

Полупроводниковый преобразователь является неотъемлемой частью современных систем электропитания технологических объектов, а также систем автоматизированного электропривода, обеспечивая их электрической энергией требуемого вида и качества. Постоянное совершенствование элементной базы полупроводниковых преобразователей за счет создания и освоения промышленностью высокоэффективных силовых приборов и вычислительных устройств на базе программируемых микроконтроллеров позволило существенно расширить функции силовых устройств и активно влиять на показатели качества потребляемой ЭП электроэнергии и их электромагнитную совместимость с питающей сетью средствами самой преобразовательной техники. Решение задач обеспечения необходимых энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей ЭП сводится к определению полной мощности ЭП и ее составляющих.

Методикам расчета и проектирования ЭП различного типа уделено достаточно внимания в литературе, изданной в 1980–90 г.г. Однако в связи с тем, что за последнее десятилетие ужесточились требования международных и отечественных стандартов к качеству энергопотребления ЭП, возникла необходимость пересмотра и доработки существующих методик расчета и проектирования. Задачи совершенствования энергетических показателей ЭП напрямую связаны с вопросами определения составляющих полной мощности. В теории мощности в цепях с несовпадающими формами напряжения и тока выделяются два направления: спектральное (рядов Фурье) и интегральное. Определение составляющих полной мощности на основе разложения на гармоники является сложной и трудоемкой операцией [1], поэтому спектральный метод не получал широкого применения. Однако в настоящее время перспективность его использования обусловлена тем, что требования международных стандартов IEC 61000-3, EN 61000-3-2,

IEEE 519 жестко регламентируют уровень гармонических составляющих тока, потребляемого электротехническим устройством, вплоть до 49-й гармоники. Отечественный ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) ограничивается гармониками до 40-й.

При проектировании систем с полупроводниковыми преобразователями необходимо не только правильно учитывать и разделять все составляющие полной или кажущейся мощности, но и закладывать мероприятия по уменьшению мощностей обменного характера. Совершенствование энергетических показателей ЭП достигается за счет снижения вклада в полную мощность ее неактивных составляющих, что позволяет уменьшить загрузку оборудования, его установленные мощности и, в конечном счете, улучшить массогабаритные показатели ЭП.

Решение вопроса об оптимальном выборе структуры и параметров элементов ЭП должно производиться в зависимости от требований, предъявляемых к электротехническому комплексу в целом с учетом типа источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Требования, предъявляемые к современным ЭП, заставляют сочетать такие их качества, как повышенная эффективность преобразования электрической энергии и надежность функционирования. Отвечать этим требованиям невозможно без учета переходных процессов в ЭП и определения электромагнитных нагрузок, воздействующих на элементы ЭП при включении ее в питающую сеть.

В данной статье рассматриваются структуры ЭП, построенных на базе источников питания переменного тока с последующим преобразованием в постоянный с односторонним потреблением и двухсторонним обменом энергией между питающей сетью и нагрузкой с против-э.д.с. При построении ЭП с двухсторонним обменом энергией между питающей сетью и нагрузкой наиболее важными являются вопросы определения структуры и параметров ЭП, обеспечивающих эффективный способ использования энергии рекуперации. Реализация в замкнутых системах электропривода эффективных тормозных режимов накладывает жесткие требования к выбору состава оборудования ЭП и определению электромагнитных нагрузок на ее элементах. Рассмотрены ЭП замкнутых систем электропривода постоянного тока (ЗС ЭППТ) с транзисторными широтно-импульсными преобразователями (ШИП), которые находят широкое применение в промышленном и научном приборостроении и других отраслях. Приведенная в статье методика позволяет выбирать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации и правильно определять структуру звена постоянного тока (ЗПТ) ЗС ЭППТ.

### **Методика анализа энергоподсистем с односторонним энергопотреблением**

ЭП, построенная на базе источника питания переменного тока с последующим преобразованием в постоянный, включает в себя выпрямитель с силовым фильтром (СФ). В ЭП с односторонним энергопотреблением схема выпрямления, схема СФ и его параметры определяются исходя из требования сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя. На практике широкое применение находят ЭП на базе выпрямителей с емкостными (С) и Г-образными индуктивно-емкостными фильтрами (LC). Для структурно-параметрического анализа таких ЭП используется методика, основанная на операторном методе совместно с методом гармонического анализа. Полная система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в ЭП на базе выпрямителей с С- и LC-фильтрами приведена в [2]. Расчет производится по спектральному составу сетевого тока с использованием преобразований Фурье и Эйлера и позволяет определить полную мощность  $S$  и ее составляющие – активную  $P$ , реактивную  $Q$  (сдвига), искажения  $T$ , несимметрии  $H$ , коэффициент полезного действия (к.п.д.) ЭП и энергетические коэффициенты –  $K_{\text{мощности}} = P/S$ ,  $K_{\text{сдвига}} = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$ , искажения синусоидальности

кривой сетевого тока, или  $K_{\text{ГАРМОНИК}} = T / \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{\sum_{k=2}^N (I_{kRMS})^2} / I_{1RMS}$ , и др., а также

мощность в нагрузке и все возможные значения токов и напряжений схемы. Численные расчеты производятся в пакете MathCAD, при этом спектры ограничиваются 40-й гармоникой согласно ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). По результатам расчетов в [2] получены диаграммы зависимостей электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей от основных параметров схем ЭП.

В ходе анализа ЭП с С-фильтрами отмечено, что они имеют низкие энергетические показатели, связанные с характерной особенностью – наличием «отсечки» тока, потребляемого из сети. При малых значениях коэффициента пульсаций по 1-й гармонике  $K_{П1}$  напряжения на нагрузке в ЭП с С-фильтром основной вклад в полную мощность вносится мощностью искажения  $T$ . Для улучшения энергетических показателей данных ЭП требуются методы с компенсацией мощности искажения (активная коррекция), которые отличаются от методов компенсации реактивной мощности.

Наилучшие энергетические показатели в ЭП с Г-образными LC-фильтрами достигаются при форме сетевого тока, близкой к прямоугольной. Требуемая форма тока в однофазной ЭП с Г-образным LC-фильтром может быть обеспечена при выполнении условия [2]

$$L_{\Phi} \geq 3R_{\text{Н}}/\omega_{\text{и}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{и}} = 2\pi f_{\text{и}}$  – угловая частота напряжения питающей сети,  $f_{\text{и}}$  – частота напряжения питающей сети,  $R_{\text{Н}}$  – активное сопротивление нагрузки,  $L_{\Phi}$  – индуктивность LC-фильтра. При выполнении условия (1) обеспечиваются следующие энергетические показатели: коэффициент мощности  $\approx 0,9$ , коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока  $\approx 0,48$ . Для трехфазной ЭП с Г-образным LC-фильтром получено условие [2]

$$L_{\Phi} \geq 0,1R_{\text{Н}}/\omega_{\text{и}}, \quad (2)$$

при выполнении которого коэффициент мощности  $\approx 0,95$ , коэффициент искажения синусоидальности кривой сетевого тока  $\approx 0,32$ . Однако даже наилучшие энергетические показатели указанных ЭП не отвечают в большинстве случаев требованиям стандартов, что заставляет разработчиков отказываться от простых выпрямительных схем на входе полупроводниковых преобразователей различных типов, а также регулируемых электроприводов на базе управляемых выпрямителей.

Явления искажения обязаны своим происхождением элементам электрической цепи, имеющим несинусоидальную форму напряжения, и компенсировать их можно, внося искажающие воздействия в форму кривых напряжений и токов преобразовательного устройства. Использование пассивных Г- и Т-образных силовых фильтров одновременно на стороне переменного и постоянного токов позволяет деформировать форму выпрямляемого напряжения, влияя таким образом на спектральный состав потребляемого электро-техническим устройством тока и саму мощность искажения, и обеспечить улучшение энергетических показателей ЭП [2]. Однако такие методы обладают рядом существенных недостатков. С точки зрения возможностей формирования входных и выходных токов и напряжений с требуемыми показателями качества более перспективно и эффективно применение схем ЭП с активной коррекцией энергетических показателей.

## Методики анализа и синтеза энергоподсистем с двухсторонним энергопотреблением

Преобразователи, обеспечивающие двухстороннее энергопотребление, т.е. возможность работы в четырех квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока, носят в отечественной литературе [3] название активных преобразователей (АП). В англоязычной литературе используется обобщенный термин – преобразователь

переменного/постоянного тока, соответствующий терминологии стандарта МЭК 60050-551 (AC/DC Converter). Управляемые силовые модули, на базе которых строится преобразователь, могут иметь разное исполнение, обеспечивая полную управляемость им в режиме потребления нагрузкой энергии и (или) рекуперации энергии в сеть.

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами и обращенный на сторону переменного тока. В режиме рекуперации энергия возвращается в сеть через инвертор рекуперации (ИР). Неуправляемый выпрямитель (НУВ) структурно входит в состав АВН, и выпрямление осуществляется через обратные диоды. Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между сетью переменного тока и АВН используется конденсатор СФ ЗПТ. В принципе работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока.

Расчет и проектирование ЭП на базе АВН должны осуществляться с учетом электромагнитных нагрузок, воздействующих на элементы ЭП при включении в питающую сеть. Эффект повышения в таких схемах достигается за счет кратковременного (относительно периода питающей сети) закорачивания цепи источника через токоограничивающий дроссель, накопления за это время энергии в дросселе и ее последующей отдачи в конденсатор СФ. В принцип работы схем повышающего типа не заложена возможность длительного (в течение периода питающей сети) отключения цепи нагрузки от цепи источника питания. При пуске ток заряда конденсатора СФ протекает через НУВ, структурно входящий в схему АВН, в результате при пуске наблюдаются такие же процессы, как в традиционных выпрямителях [2].

В качестве систем с двухсторонним энергопотреблением чаще всего выступают электроприводы постоянного или переменного токов. Наиболее массовое практическое применение в регулируемых электроприводах получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В современных системах электропривода постоянного тока энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, включает в себя силовые цепи сети переменного тока, НУВ или АВН, СФ, тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад транзисторного ШИП, ДПТ.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов. Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами энергетической подсистемы, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые моменты, скорости и ускорения двигателя, если они не заложены в ЭП. Для ЭП ЗС ЭППТ решающими факторами при выборе их структуры и расчете параметров элементов являются обеспечение надежной коммутации силовых ключей ШИП и прием энергии рекуперации вращающихся частей электропривода [4].

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Принципиально существует три возможности:

- 1) аккумулирование (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- 2) использование ТЦ, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- 3) рекуперация (возврат) энергии в сеть посредством ИР (использование электрической энергии другим пользователем).

Величины рекуперированной энергии в емкость СФ и электромагнитных нагрузок на элементы ЭП, а также их зависимости от параметров системы электропривода и ре-



жима ее работы определяются по методике, использующей диаграмму нагрузки электропривода [4]. Наиболее тяжелым режимом работы ЗС ЭППТ с ШИП, при котором электромагнитные нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне  $\bar{I}_0$ . Для данного режима работы кинетическая энергия вращающихся частей электропривода на интервале рекуперации определяется, согласно [2], как

$$\bar{W}_{\text{РЕК}} = (\bar{\Omega}_y^2 - \bar{I}_0^2), \quad (3)$$

где  $W_{\text{max}} = J_{\Sigma} \Omega_{\text{XX}}^2 / 2$ ,  $U_{\text{Б}} = c_{\text{Е}}' \Omega_{\text{XX}}$ ,  $I_{\text{КЗ}} = U_{\text{Б}} / r_{\text{Я}}$ ,  $\Omega_y$  – величина скорости в установившемся режиме,  $J_{\Sigma}$  – приведенный момент инерции двигателя с нагрузкой,  $r_{\text{Я}}$  – сопротивление обмотки якоря,  $c_{\text{Е}}'$  – конструктивный коэффициент. С учетом того, что эта энергия за время рекуперации рассеивается в якорной цепи машины и заряжает емкость СФ, т.е. является суммой двух составляющих, получим формулу для определения величины энергии, запасаемой в емкости СФ [2]:

$$\bar{W}_{\text{С}} = \bar{I}_0 (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0)^2 / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}), \quad (4)$$

где  $\bar{I}_{\text{СТ}}$  – ток, обусловленный статическим моментом нагрузки. Энергия, потребляемая из звена постоянного тока за времена интервалов разгона  $t_p$ , движения с установившейся скоростью  $t_y$  и торможения  $t_T$ , т.е. за время  $T_{\text{П}} = t_T + t_p + t_y$  [2], равна

$$\bar{W}_{\text{П}} = \frac{\frac{\bar{I}_0^3}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}} + \frac{\bar{I}_0 \bar{\Omega}_y (\bar{\Omega}_y + 2\bar{I}_0)}{(\bar{I}_0 - \bar{I}_{\text{СТ}})} + 2\bar{I}_{\text{СТ}} \left( \frac{T_{\text{П}}}{T_{\text{М}}} - \frac{2\bar{\Omega}_y \bar{I}_0}{(\bar{I}_0^2 - \bar{I}_{\text{СТ}}^2)} \right) (\bar{\Omega}_y + \bar{I}_{\text{СТ}})}{\eta_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где  $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ДПТ}} \cdot \eta_{\text{ШИП}}$ ,  $\eta_{\text{ДПТ}}$  – к.п.д. ДПТ,  $\eta_{\text{ШИП}}$  – к.п.д. ШИП,  $T_{\text{М}}$  – электромеханическая постоянная времени. Полученные зависимости (4) и (5) позволяют соотнести энергию  $\bar{W}_{\text{С}}$  с потребляемой из сети электрической энергией  $\bar{W}_{\text{П}}$  за время  $T_{\text{П}}$  при заданных параметрах нагрузки и режима работы и дают возможность сравнивать эффективность различных способов использования энергии рекуперации при заданных требованиях к энергетическим, массогабаритным и эксплуатационным характеристикам системы электропривода в целом.

Исходя из электромеханических (низкочастотных) процессов в ЭП ЗС ЭППТ, когда ТЦ и АВН не используются, напряжение на конденсаторе СФ в конце интервала рекуперации определяется [2] как

$$\bar{U}_{\text{Сmax}} = \sqrt{\bar{W}_{\text{С}} (T_{\text{М}} / r_{\text{Я}} C_{\text{Ф}}) + \bar{U}_{\text{С0y}}^2}, \quad (6)$$

где величина напряжения на конденсаторе СФ в начале интервала рекуперации  $\bar{U}_{\text{С0y}}$ , т.е. на интервале движения с установившейся скоростью, определяется по формуле [2]

$$\bar{U}_{\text{С0y}} = \sqrt{1 - (2\bar{I}_{\text{СТ}} / r_{\text{Я}} C_{\text{Ф}} p f_{\text{И}})}. \quad (7)$$

На основании выражений (6) и (7) можно установить соотношение для определения емкости конденсатора СФ из условия ограничения напряжения на нем на заданном уровне  $\bar{U}_{\text{Сmax зад}}$  в режиме рекуперации [2]:

$$C_{\text{Ф1}} = [\bar{W}_{\text{С}} T_{\text{М}} - (2\bar{I}_{\text{СТ}} / p f_{\text{И}})] / [r_{\text{Я}} (\bar{U}_{\text{Сmax зад}}^2 - 1)]. \quad (8)$$

Из условия минимально допустимого снижения напряжения на конденсаторе СФ  $\bar{U}_{\text{Сmin}}$  на интервале разгона при заданном уровне токоограничения  $\bar{I}_0$  емкость СФ выбирается [2] как

$$C_{\text{Ф2}} = 2\bar{I}_0 / [r_{\text{Я}} (1 - \bar{U}_{\text{Сmin}}^2) p f_{\text{И}}]. \quad (9)$$

На основании соотношений (4)–(9) формулируется методика выбора параметров дискретно функционирующей тормозной цепи ЗПТ в ЗС ЭПТ с ШИП. Применение ТЦ целесообразно при  $C_{\Phi 1} > C_{\Phi 2}$ , что позволяет снизить величину емкости конденсатора СФ до значения  $C_{\Phi 2}$  и его установленную мощность. Выбор параметров ТЦ производится из условия ограничения напряжения на конденсаторе СФ на заданном уровне  $\bar{U}_{C \max \text{ зад}}$  в режиме рекуперации. Время включения тормозной цепи  $t_0$  определяется из равенства [2]:

$$(\bar{U}_{C \max \text{ зад}}^2 - \bar{U}_{C 0 y}^2) r_{\text{я}} C_{\Phi 2} / T_{\text{М}} = \bar{W}_{\text{С}}(t_0), \quad (10)$$

при величине емкости СФ, равной  $C_{\Phi 2}$ , где

$$\bar{W}_{\text{С}}(t_0) = \bar{I}_0 t_0 [2(\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) - (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}})(t_0 / T_{\text{М}})] / T_{\text{М}}. \quad (11)$$

Выражение (11) определяет энергию, аккумулируемую в конденсаторе СФ, за время от начала рекуперации до момента достижения напряжения на емкости СФ заданного уровня  $\bar{U}_{C \max \text{ зад}}$ . Энергия и рассеиваемая мощность в ТЦ [2]:

$$\bar{W}_{\text{ТЦ}} = r_{\text{я}} C_{\Phi 2} (\bar{U}_{C \max}^2 - \bar{U}_{C \max \text{ зад}}^2) / T_{\text{М}}, \quad (12)$$

$$P_{\text{ТЦ}} = \bar{W}_{\text{ТЦ}} / (t_{\text{РЕК}} - t_0), \quad (13)$$

где

$$t_{\text{РЕК}} = T_{\text{М}} (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{\text{СТ}}). \quad (14)$$

Сопротивление тормозного резистора выбирается согласно [2]:

$$R_{\text{ТЦ}} = U_{C \max \text{ зад}}^2 / P_{\text{ТЦ}}. \quad (15)$$

При этом действующее значение тока в ТЦ определяется [2] как

$$I_{\text{ТЦ rms}} = \sqrt{P_{\text{ТЦ}} / R_{\text{ТЦ}}}. \quad (16)$$

Таким образом, разработанная методика и найденные зависимости позволяют решать вопросы параметрической оптимизации ЭП электротехнических комплексов и систем приборного электропривода с высокими энергетическими показателями. В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить множество параметров элементов ЭП, обеспечивающих экстремальность каких-либо целей при заданных ограничениях на множество внутренних переменных. Поэтому эту задачу называют задачей параметрической оптимизации, и ее разрешимость определяется размерностью оптимизируемой системы [5, 6].

Разработанная методика, по существу, применима для решения задач анализа ЭП, т.е. позволяет сформулировать свойства ЭП по результатам решения. Для непосредственного ее использования в целях синтеза ЭП в проектировании поиск вариантов должен проводиться в ходе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта ЭП. Разработанная методика позволяет получить требуемую аналитическую модель ЭП и составить целевую функцию.

Поставленная и решаемая задача поиска оптимального проекта относится к классу задач нелинейного программирования. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных может быть установлена аналитической моделью ЭП [5, 6]. В простейшем случае целевая функция представляет собой линейную комбинацию нормированных переменных модели с весовыми коэффициентами. В данной статье не рассматриваются вопросы, касающиеся выбора метода или оптимизационного алгоритма, исследования его сходимости. Решение оптимизационной задачи осуществляется приведенными в литературе [5, 6] алгоритмами и методами, конкретно – методом деформируемого многогранника [6]. Программы оптимизации также приводятся в литературе [6] и взяты за базу для решения оптимизационной задачи [7].

Приведенная методика структурно-параметрического синтеза ЭП ЗС электропривода при двухстороннем энергообмене между источником и нагрузкой позволяет выбрать состав оборудования ЭП – силового фильтра, тормозной цепи и АВН, а также определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперированной энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограмм работы ЗС электропривода.

### Верификация результатов исследований

В современных интегрированных пакетах MathCAD, OrCAD/Pspice, MATLAB/Simulink реализованы модели энергоподсистем с односторонним энергопотреблением, а также модели ЗС ЭППТ с ШИП.

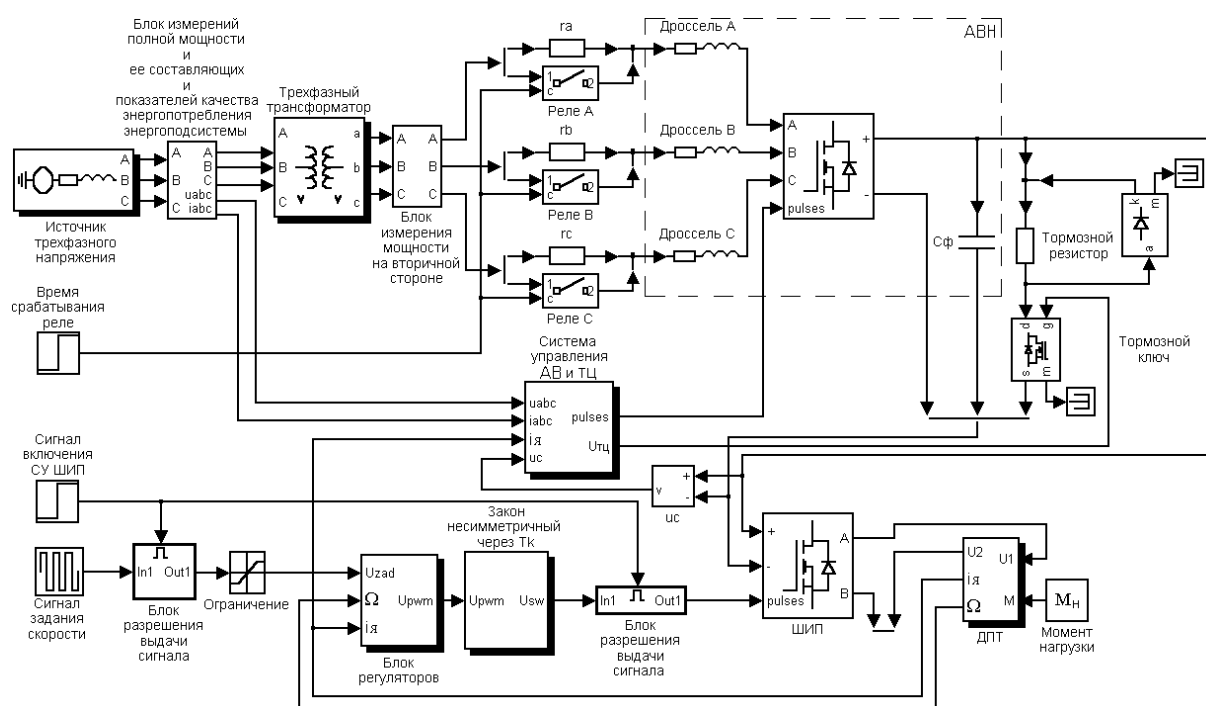


Рис. 1. Модель ЗС ЭППТ с ШИП на базе трехфазного АВН

Модель ЗС ЭППТ на базе АВН, реализованная в пакете MATLAB/Simulink [2], представлена на рис. 1. Модель включает отдельные модели элементов ЭП (источника питания, сетевого трансформатора, вентильного блока НУВ или АВН, ШИП, ДПТ), информационной подсистемы (системы управления ШИП, состоящей из блока регуляторов и формирователя сигналов управления ключами ШИП по соответствующему алгоритму, системы управления ИР и ТЦ, блока измерений полной мощности и ее составляющих и показателей качества энергопотребления ЭП [8, 9]), а также блока измерения мощности на вторичной стороне трансформатора. Система управления и регулирования АВН является двухконтурной с внешним контуром регулирования напряжения ЗПТ на базе пропорционально-интегрального регулятора и внутренним подчиненным контуром регулирования сетевых токов [2].

Установлено [2], что применение АВН в ЗС ЭППТ с ШИП позволяет снизить емкость конденсатора СФ ЗПТ и его установленную мощность, стабилизировать напряжение в ЗПТ и регулировать его с заданной динамикой, обеспечить рекуперацию энергии в сеть и тем самым повысить энергетическую эффективность системы электропривода, улучшить показатели качества энергопотребления ЭП. Однако таким системам

присущи следующие особенности и недостатки: при использовании сетевого трансформатора его габаритную мощность потребуется выбирать завышенной относительно ЭП на базе НУВ или ограничивать на заданном уровне сетевой ток, что снизит динамические качества ЗС ЭППТ; должно быть гарантировано, что энергия может быть возвращена в питающую сеть, т.е. необходимо дополнительно учитывать характер сети электроснабжения.

Экспериментальные исследования ЭП ЗС ЭППТ проводились на лабораторном комплексе «Прецизионный приборный электропривод с улучшенными энергетическими показателями и компьютерным управлением» [10] и на опытных образцах ЗС ЭППТ квантово-оптических систем различного назначения, разработанных на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем (ЭТиПЭМС) СПбГУ ИТМО по госбюджетным и хоздоговорным НИР. Экспериментальные исследования ЭП с односторонним энергопотреблением и ЗС ЭППТ подтвердили справедливость полученных теоретических положений, доказали адекватность моделей.

### Заключение

В статье рассматриваются методики анализа и синтеза ЭП электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателями при одно- и двухстороннем энергопотреблении в зависимости от типа и свойств первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки.

Изложена методика структурно-параметрического анализа ЭП при одностороннем потреблении электроэнергии с учетом свойств первичного источника питания и начальной фазы включения в питающую сеть, позволяющая уменьшить электромагнитные нагрузки на элементы ЭП и улучшить их энергетические показатели. Методика структурно-параметрического синтеза ЭП замкнутых систем электропривода при двухстороннем энергообмене между источником и нагрузкой позволяет выбрать состав оборудования ЭП и определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперированной энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограмм работы замкнутой системы электропривода. Предложена методика выбора структуры ЭП, расчета параметров ее элементов и электромагнитных нагрузок на них на примере ЗС ЭППТ с ШИП. Поиск вариантов проекта проводится в процессе решения оптимизационной задачи, что позволяет сделать обоснованный выбор окончательного варианта проекта ЭП. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных устанавливается аналитической моделью ЭП.

Обоснованность и достоверность результатов исследований базируется на использовании известных положений теории энергетических процессов в вентильных преобразователях и теории электропривода, подтверждается моделированием систем в современных интегрированных пакетах MathCAD, MATLAB/Simulink, OrCAD/PSpice, сравнением с данными из литературных источников, а также достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований.

Разработанные математические модели позволяют определять составляющие полной мощности, показатели качества энергопотребления ЭП [8, 9], структуру и параметры ЭП ЗС ЭППТ на базе неуправляемого выпрямителя и АВН.

Результаты работы нашли практическое применение при проектировании квантово-оптических систем нового поколения на базе рассмотренных ЗС ЭППТ на кафедре ЭТиПЭМС СПбГУ ИТМО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе г. Санкт-Петербурга по гранту PD07-2.0-90 в рамках региональной программы «Развитие высшей школы г. Санкт-Петербурга» на 2007 г.

## Литература

1. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: пер. с польск. под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
2. Борисов П.А. Совершенствование энергетических показателей электротехнических комплексов и систем с полупроводниковыми преобразователями: Дисс. ... канд. техн. наук. – СПб, 2005.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с., ил.
4. Томасов В.С., Сеницын В.А., Борисов П.А. Исследование электромагнитных процессов в энергетическом канале замкнутой системы электропривода постоянного тока // Изв. вузов. – Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 9–16.
5. Тонкаль В.Е. Оптимизация силовых полупроводниковых преобразователей / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, М.Т. Стрелков. Оптимизация схем и параметров устройств преобразовательной техники. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 3–13.
6. Банди Б. Методы оптимизации: вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988.
7. Борисов П.А. Оптимизация энергоподсистем электротехнических устройств на базе неуправляемых выпрямителей // Сборник трудов II конференции молодых ученых и специалистов СПб ГУ ИТМО. – 2005. – Т. 2. – С. 30–37.
8. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.
9. Борисов П.А. Применение MATLAB/Simulink для измерения и оценки качества электроэнергии в трехфазных симметричных системах с активными преобразователями // Труды II-й Всероссийской научной конференции. Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. – М., 2004. – С. 1372–1387.
10. Борисов П.А., Денисов К.М., Жданов И.Н., Лукичев Д.В., Сеницын В.А., Томасов В.С. Лабораторный комплекс «Прецизионный приборный электропривод с улучшенными энергетическими показателями и компьютерным управлением» // Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции «Образовательная среда сегодня и завтра». – М., 2005. – С. 47–49.

**Борисов Павел Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru  
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий кафедрой, кандидат технических наук, доцент, tomasov@ets.ifmo.ru

**Томасов Валентин Сергеевич**

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЕМ ВОЗДУХ–ТОПЛИВО И КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ В ИНЖЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.Н. Герасимов, С.А. Колюбин, В.О. Никифоров

В статье предложен алгоритм адаптивного двухканального управления соотношением воздух–топливо и крутящим моментом в инжекторных двигателях внутреннего сгорания. Управление синтезировано на основе нелинейной математической модели двигателя и предусматривает использование специальных интегральных алгоритмов адаптации, обладающих высоким быстродействием.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, адаптивное управление, нелинейные системы.

### Введение

Развитие современного автомобилестроения неотъемлемо связано с совершенствованием двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что обусловлено ужесточением требований к выбросам вредных веществ в атмосферу, а также конкурентной борьбой за улучшение энергетических и экономических характеристик двигателей. Чтобы удовлетворить предъявляемым требованиям, мировые автопроизводители ведут активные разработки как в области совершенствования конструкции двигателей, так и в области создания эффективных систем автоматического управления двигателями. С появлением оснащенных микропроцессорными системами инжекторных двигателей (в которых подача топлива осуществляется путем принудительного впрыска) открылись широкие возможности применения современных методов теории автоматического управления [1, 2].

Важно отметить, что ДВС как объект управления является сложной нелинейной системой, которая подвергается воздействию внешних возмущающих факторов. Кроме того, многие параметры двигателя изменяются во время его работы, а ряд переменных величин, характеризующих состояние двигателя, не доступен прямому измерению или измеряется с запаздыванием и искажениями. В связи с этим перед разработчиком системы автоматического управления стоит нетривиальная и комплексная задача синтеза регуляторов, базирующихся на принципах нелинейного, адаптивного или самообучающегося управления [3–6].

Важной характеристикой, которая влияет на мощность и токсичность выбросов двигателя, является коэффициент избытка воздуха, так называемый  $\lambda$ -коэффициент, который показывает отношение реального соотношения масс воздух–топливо (В–Т), поступающих в цилиндр, к идеальному (стехиометрическому), при котором происходит полное сгорание топливной смеси [7, 8]. Для бензиновой смеси стехиометрическое соотношение равно 14,7. Соответственно, при  $\lambda = 1$  смесь называется нормальной, при  $\lambda < 1$  – богатой, а при  $\lambda > 1$  – бедной. Оптимальные характеристики работы двигателя достигаются при  $\lambda = 1$ . Таким образом, регулирование соотношения В–Т, т.е. стабилизация  $\lambda$ -коэффициента, является важнейшей задачей управления инжекторным ДВС.

Для реализации обратной связи при управлении соотношением воздух–топливо на практике используются датчики кислорода ( $\lambda$ -зонды), которые позволяют оценить действительное значение соотношения В–Т в цилиндрах. Однако инерционность таких датчиков и их расположение на некотором расстоянии от цилиндров (в выпускном коллекторе) обуславливают наличие запаздывания в канале измерения, что является препятствием на пути разработки системы управления.

Другой важной задачей автоматического управления двигателем является поддержание крутящего момента на валу с целью повышения срока службы его узлов и элементов, а также улучшения технических характеристик. Обеспечение обратной свя-

зи по моменту осуществляется либо с помощью датчиков крутящего момента, либо специальными алгоритмами наблюдения.

Указанным задачам автоматического управления двигателями в последние два десятилетия уделяется значительное внимание [9–13]. Однако, несмотря на большое количество публикаций, эти задачи не могут считаться окончательно решенными. Многие предлагаемые подходы базируются на использовании упрощенных, линеаризованных моделей двигателя, не учитывают возможные существенные параметрические вариации двигателя и рассматривают две выделенные выше задачи отдельно.

В настоящей статье предлагается двухканальная система одновременного управления соотношением воздух–топливо и крутящим моментом, построенная на основе нелинейной модели двигателя внутреннего сгорания и обеспечивающая адаптацию к текущим вариациям параметров объекта управления.

### Постановка задачи

Задачи управления соотношением воздух–топливо  $\lambda$  и крутящим моментом  $M$  могут быть формализованы следующим образом: компенсировать нелинейности и параметрические неопределенности, присущие двигателю, а также компенсировать запаздывание в канале измерения соотношения В–Т и обеспечить выполнение следующих целевых неравенств:

$$|\lambda(t) - 1| < \Delta_\lambda \text{ для всех } t > T, \quad (1)$$

$$|M(t) - M^*(t)| < \Delta_M \text{ для всех } t > T, \quad (2)$$

где  $T$  – время прогрева двигателя,  $\Delta_\lambda$  – заданная точность стабилизации соотношения В–Т (за единицу в данном случае принимается стехиометрическое соотношение В–Т в цилиндрах),  $M^*(t)$  – желаемое значение крутящего момента  $M(t)$ ,  $\Delta_M$  – точность слежения по моменту. На практике к задаче стабилизации соотношения В–Т предъявляются гораздо более жесткие требования, чем к задаче слежения за моментом: как правило,  $\Delta\lambda = 0,03\text{--}0,05$ , а  $\Delta_M = 15\text{--}20$  Н·м.

Сигналом управления соотношением В–Т является поток топлива, впрыскиваемого форсунками,  $\mu_{fi}$ , а сигналом управления крутящим моментом – угол открытия заслонки впускного коллектора  $\alpha$ .

На первом этапе решения задач управления строится математическая модель инжекторного ДВС [11, 12, 14], на основе анализа которой синтезируются алгоритмы адаптации.

### Математическая модель инжекторного ДВС

Разработанная математическая модель инжекторного ДВС [14] описывает последовательность преобразования управляющих воздействий (потока топлива, впрыскиваемого форсункой,  $u_1 = \mu_{fi}$ , и угла поворота дроссельной заслонки  $u_2 = \alpha$ ) в переменные состояния двигателя (скорость вращения коленчатого вала  $x_1 = \omega$ , масса топливной пленки, образующейся на стенках впускного коллектора,  $x_2 = \mu_{ff}$ , и давление воздуха во впускном коллекторе  $x_3 = P_m$ ) и в регулируемые переменные (соотношение, обратное соотношению В–Т,  $y_1 = 1/\lambda$ , и крутящий момент  $y_2 = M$ ). Все переменные модели являются усредненными за один цикл работы двигателя. Модель синтезирована на основе описания физических процессов, протекающих в двигателе, и представляется следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений [14]:

$$\dot{x}_1 = \eta_f(x_1)b_1x_3\varphi_3(y_1)\varphi_4(\alpha_{ign}) - a_{01} - a_{02}x_1 - a_{03}x_1^2 - \delta(t), \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1x_2 + b_2u_1, \quad (4)$$

$$\dot{x}_3 = -a_2x_1x_3 + b_3\varphi_1(x_3)\varphi_2(u_2), \quad (5)$$

$$y_1 = \frac{1}{x_1x_3}(x_2 + (1 - b_2/a_1)u_1), \quad (6)$$

$$y_2 = c_2\eta_f(x_1)x_3\varphi_3(y_1)\varphi_4(\alpha_{ign}) - c_{01} - c_{02}x_1 - c_{03}x_1^2, \quad (7)$$

$$z(t) = y_1(t - \tau_0), \quad (8)$$

где  $z$  – выходной сигнал  $\lambda$ -сенсора,  $\delta(t)$  – внешнее возмущение, вызванное моментами внешних нагрузок,  $a_i, b_{i,j}, c_i, d_i$  – параметры модели,  $\varphi_1(x_3), \varphi_2(u_2), \varphi_3(y_1), \varphi_4(\alpha_{ign}), \eta_f(x_1)$  – статические нелинейные функции, определяемые экспериментально,  $\tau_0$  – транспортное запаздывание, обусловленное временем течения выхлопных газов от цилиндров до чувствительного элемента датчика,  $\alpha_{ign}$  – угол опережения зажигания. Отметим, что в качестве регулируемой переменной  $y_1$  используется величина, обратная соотношению В–Т, так как она является линейной по управлению. Очевидно, что желаемому значению соотношения В–Т  $\lambda = 1$  будет соответствовать такое же соотношение топливо–воздух (Т–В)  $\phi = 1$ .

Итак, модель состоит из шести уравнений, каждое из которых описывает следующие физические процессы:

- уравнение (3) описывает динамику вращения коленчатого вала двигателя;
- уравнение (4) описывает процесс осаждения топлива на стенках впускного коллектора;
- уравнение (5) описывает изменение давления воздуха во впускном коллекторе;
- уравнение (6) связывает динамику осаждения топлива на стенках коллектора с регулируемой переменной  $y_1 = 1/\lambda$ ;
- уравнение (7) определяет зависимость регулируемой переменной  $y_2 = M$  от переменных управления и состояния модели, а также от величины соотношения Т–В  $y_1$ ;
- уравнение (8) описывает запаздывание в измерениях соотношения Т–В.

Важной особенностью модели является ее параметрическая неопределенность. Прежде всего, это вызвано неизвестностью и возможными вариациями постоянной времени процесса испарения топливной пленки со стенок коллектора, а также коэффициента, определяющего часть топлива, которая непосредственно попадает в цилиндры. Кроме того, параметры уравнения (5) могут варьироваться в зависимости от режимов и условий работы двигателя. В связи с этим справедливо предполагать, что известны лишь пределы изменения параметров уравнений (3)–(5), тогда как сами параметры неизвестны. Следует также отметить, что состояние  $x_2 = \mu_{ff}$  не доступно прямому измерению.

Таким образом, неопределенность параметров модели и недоступность прямому измерению переменной  $\mu_{ff}$  мотивируют необходимость применения методов адаптивного управления при решении поставленных задач.

### Алгоритм адаптивного управления соотношением В–Т

Для решения задачи стабилизации соотношения В–Т, в частности, необходимо компенсировать запаздывание  $\tau_0$  в канале измерения. Компенсацию целесообразно в данном случае осуществлять комплексно с адаптивной идентификацией параметров



модели. Для построения идентификатора формируются специальные динамические фильтры [4, 15]:

$$\dot{\xi}_1(t) = -k_0 \xi_1(t) + x_1(t)x_3(t)y_1(t - \tau), \quad (9)$$

$$\dot{v}_1(t) = -k_0 v_1(t) + u_1(t - \tau), \quad (10)$$

где  $k_0 > 0$  – параметр фильтров.

Нетрудно показать, что с помощью фильтров (9), (10) параметризованная модель регулируемой переменной принимает следующий вид:

$$y_1(t - \tau) = \theta^T(t)\omega(t) + \omega_0(t), \quad (11)$$

$$\omega_0(t) = \frac{1}{x_1(t)x_3(t)}(k_0 \xi_1(t) + k_0 v_1(t) + u_1(t - \tau)),$$

$$\omega^T(t) = \frac{1}{x_1(t)x_3(t)}[\xi_1(t) - v_1(t); k_0 v_1(t) - u_1(t - \tau)]^T,$$

где  $\theta^T = [-a_1 \quad b_2/a_1]^T$  – вектор неизвестных параметров модели,  $\omega_0$  – измеряемая функция, а  $\omega$  – вектор измеряемых функций (регрессор).

На основе представления регулируемой переменной (11) строится алгоритм идентификации неизвестных параметров, минимизирующий интеграл от квадрата ошибки идентификации по всем прошлым значениям времени [3, 15]:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \text{Proj}_{\Omega_0} \left\{ \gamma(t) \int_0^t \eta(t, \tau) \omega(\tau) \bar{y}_1(\tau) d\tau - \gamma(t) \int_0^t \eta(t, \tau) \omega(\tau) \omega^T(\tau) d\tau \hat{\theta}(t) \right\}, \hat{\theta}(0) = \theta_0, \quad (12)$$

$$\gamma(t) = \rho \left( \kappa I + \int_0^t \eta(t, \tau) \omega(\tau) \omega^T(\tau) d\tau \right), \quad (13)$$

$$\bar{y}_1(t) = y_1(t - \tau) - \omega_0(t), \quad (14)$$

где  $\hat{\theta}^T(t)$  – оценка вектора  $\theta$ ,  $\text{Proj}\{\}$  – оператор проекции, который призван предотвратить уход параметров за границы априори известных множеств неизвестных параметров вектора  $\theta$  [3],  $\eta(t, \tau) = \exp(-\mu(t - \tau))$  – фактор списывания, необходимый для ограничения роста интегралов в выражениях алгоритма,  $\mu > 0$ ,  $\rho > 0$  и малая величина  $\kappa$  – параметры алгоритма.

Система, состоящая из модели (12) и алгоритма идентификации (12)–(14), имеет следующие свойства [5]:

1. вектор оценок  $\hat{\theta}(t)$  ограничен;
2.  $e(t) = \bar{y}_1(t) - \hat{\theta}^T(t)\omega(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ ;
3.  $\tilde{\theta}(t) = \theta - \hat{\theta}(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , если регрессор  $\omega(t)$  состоит из линейно независимых компонентов и удовлетворяет условию исчезающего возбуждения [5];
4. если элементы вектора  $\omega(t)$  линейно независимы, то скорость сходимости может быть увеличена путем увеличения параметра  $\rho$  и уменьшения параметра  $\kappa$ ; таким образом, регулируя параметры  $\rho$  и  $\kappa$ , можно увеличить быстродействие алгоритма (12)–(14).

Для доказательства этого свойства сформируем модель параметрических ошибок  $\tilde{\theta}(t)$  в следующем виде:

$$\dot{\tilde{\theta}}(t) = -\rho \left( \kappa I + \int_0^t \eta(t, \tau) \omega(\tau) \omega^T(\tau) d\tau \right)^{-1} \int_0^t \eta(t, \tau) \omega(\tau) \omega^T(\tau) d\tau \tilde{\theta}(t) \approx -\rho \tilde{\theta}(t). \quad (15)$$

Нетрудно показать, что при малых значениях  $\kappa$  параметрические ошибки  $\tilde{\theta}(t)$  сходятся к нулю экспоненциально. При увеличении параметра  $\rho$  увеличивается быст-

родействие идентификатора, что позволяет реализовать алгоритм (12)–(14) на практике. Для компенсации запаздывания в канале измерения соотношения В–Т разработан предиктор, необходимый для восстановления текущих значений переменной состояния  $x_2(t)$  и регулируемой переменной  $y_1(t)$ , которые используются в регуляторе. Предиктор использует настраиваемые параметры, генерируемые алгоритмом адаптации (12)–(14), и может быть представлен в следующем виде:

$$\dot{I}(t) = -\hat{a}_1 I(t) + \hat{b}_2 u(t) - \exp(-\hat{a}_1 \tau_0) \hat{b}_2 u_1(t - \tau_0), \quad I(0) = 0, \quad (16)$$

$$\hat{x}_2(t) = \exp(-\hat{a}_1 \tau_0) \cdot \hat{x}_2(t - \tau_0) + I(t), \quad (17)$$

$$\hat{y}_1(t) = \frac{1}{x_1(t)x_3(t)} \left( \hat{x}_2(t) + \left( 1 - \frac{\hat{b}_2(t)}{\hat{a}_1(t)} \right) u_1(t) \right), \quad (18)$$

где параметры  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{b}_2$ ,  $\hat{d}_1$  рассчитываются с помощью следующих соотношений:

$$\hat{a}_1 = -\hat{\theta}_1, \quad \hat{b}_2 = -\hat{\theta}_1 \hat{\theta}_2, \quad \hat{d}_1 = 1 - \hat{\theta}_2. \quad (19)$$

На основе информации, обеспечиваемой алгоритмом адаптации (12)–(14) и предиктором (16)–(18), строится физически реализуемый закон управления:

$$u_1(t) = \frac{1}{(1 - \hat{\theta}_2(t))} (-\hat{x}_2(t) + x_1(t)x_3(t)). \quad (20)$$

Необходимо отметить, что для предотвращения возможного деления на ноль в выражении (20) в алгоритме (12)–(14) используется оператор проекции.

### Алгоритм адаптивного управления крутящим моментом

Синтез адаптивного регулятора крутящим моментом осуществляется аналогичным образом. Для идентификации неизвестных параметров уравнения давления (5) формируются фильтры вида

$$\dot{\xi}_2(t) = -r_0 \xi_2(t) + x_3(t), \quad (21)$$

$$\dot{\xi}_3(t) = -r_0 \xi_3(t) + x_1(t)x_3(t), \quad (22)$$

$$\dot{v}_2(t) = -r_0 v_2(t) + \varphi_1(x_3(t))\varphi_2(u_2(t)), \quad (23)$$

где  $r_0 > 0$  – параметр. На основе фильтров строится параметризованная модель переменной состояния  $x_3(t)$

$$x_3(t) = \mathcal{G}^T \varphi(t) + \xi_2(t), \quad (24)$$

где  $\mathcal{G}^T = [-a_2 \ b_3]^T$  – вектор неизвестных параметров,  $\varphi^T(t) = [\xi_3(t); v_2(t)]^T$  – вектор измеряемых функций (регрессор).

Представление (24) позволяет идентифицировать неизвестные параметры с помощью алгоритма адаптации вида (12)–(14). Алгоритм может быть представлен следующими уравнениями:

$$\bar{x}_3(t) = x_3(t) - \xi_2(t), \quad (25)$$

$$\hat{\mathcal{G}}(t) = \text{Pr}_{\Omega_3} \left\{ \bar{\gamma}(t) \int_0^t \bar{\eta}(t, \tau) \varphi(\tau) \bar{x}_3(\tau) d\tau - \bar{\gamma}(t) \int_0^t \bar{\eta}(t, \tau) \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau \hat{\mathcal{G}}(t) \right\}, \quad \hat{\mathcal{G}}(0) = \mathcal{G}_0, \quad (26)$$

$$\bar{\gamma}(t) = \bar{\rho} \left( \bar{\kappa} I + \int_0^t \bar{\eta}(t, \tau) \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau \right)^{-1}, \quad (27)$$

где  $\hat{\mathcal{G}}(t)$  – оценка вектора  $\mathcal{G}$ ,  $\bar{\eta}(t, \tau) = \exp(-\bar{\mu}(t - \tau))$ ,  $\bar{\rho} > 0$ ,  $\bar{\mu} > 0$ ,  $\bar{\kappa} > 0$  – параметры алгоритма адаптации.

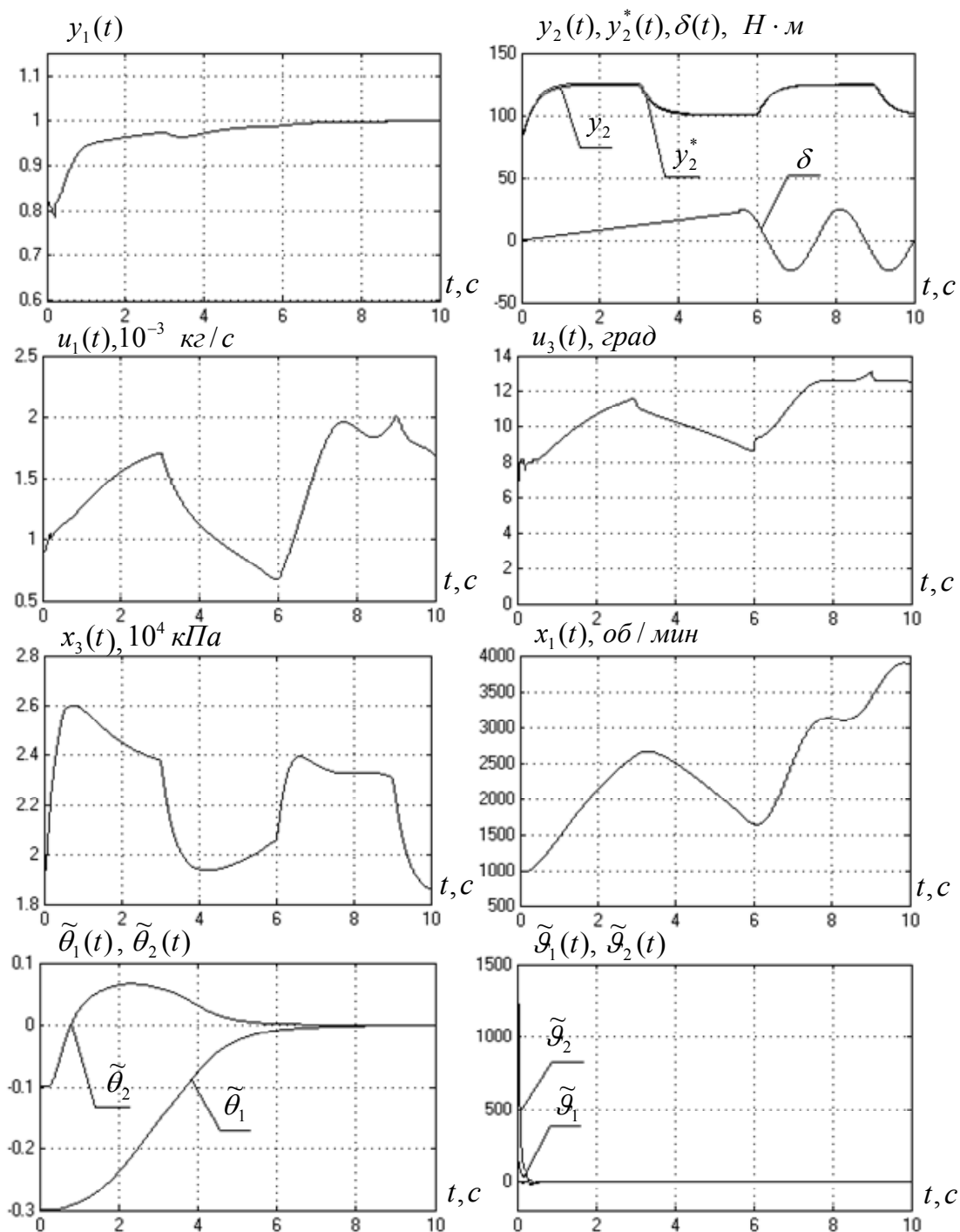


Рис. 1. Результаты моделирования адаптивной системы управления соотношением В–Т и крутящим моментом с компенсацией запаздывания в канале измерения соотношения В–Т

На основе анализа уравнения модели двигателя (5) и (7) и методов модального управления [16] строится закон управления крутящим моментом, описываемый следующим выражением:

$$u_2(t) = \varphi_2^{-1} \left( \frac{1}{\hat{b}_3 \varphi_1(x_3)} \left( -\sigma x_3(t) + \hat{a}_2 x_1(t) x_3(t) + \frac{y_2^*(t) + c_{01} + c_{02} x_1 + c_{03} x_1^2}{c_2 \eta_f(x_1) \varphi_3(\hat{y}_1) \varphi_4(\alpha_{ign})} \right) \right), \quad (28)$$

где  $\sigma > 0$  – параметр регулятора, оценка  $\hat{y}_1$  генерируется предиктором (16)–(18),  $y_2^*(t) = M^*(t)$  – задание по крутящему моменту. Настраиваемые параметры регулятора определяются как

$$\hat{a}_2 = -\hat{\mathfrak{G}}_1, \quad \hat{b}_3 = \hat{\mathfrak{G}}_2. \quad (29)$$

С целью предотвращения возможного деления на ноль в выражении (28) в алгоритме (25)–(27) используется оператор проекции [3].

Таким образом, адаптивный двухканальный регулятор соотношения В–Т и крутящего момента, обеспечивающий условия (1), (2), представлен:

- фильтрами (9), (10), (21), (22), (23);
- алгоритмами адаптивной идентификации (12)–(14), (25)–(27);
- предиктором (16)–(18);
- настраиваемыми регуляторами (20), (28).

Можно показать, что при отсутствии внешнего возмущения  $\delta(t)$  в рамках модели двигателя (3)–(8) представленный регулятор обеспечивает абсолютную точность стабилизации соотношения воздух–топливо и слежения крутящего момента за эталонным значением.

## Моделирование

Для иллюстрации результатов теоретических исследований в среде MathLab/Simulink было проведено моделирование. Параметры и статические функции модели двигателя (3)–(8) были рассчитаны на основе характеристик двигателя V8 автомобиля Corvette. Параметры двухканального регулятора выбраны в процессе моделирования. Результаты моделирования приведены на рис. 1, где  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ ,  $\tilde{\mathfrak{G}} = \mathfrak{G} - \hat{\mathfrak{G}}$  – векторы параметрических ошибок.

## Заключение

Результаты моделирования системы управления демонстрируют высокое качество стабилизации соотношения В–Т и слежения крутящего момента за эталонным сигналом. Таким образом, предложенный двухканальный адаптивный регулятор обеспечивает компенсацию нелинейностей объекта, параметрических неопределенностей и запаздывания в канале измерения соотношения В–Т и выполнение целевых неравенств (1), (2).

## Литература

1. Пинский Ф.И., Давтян Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания: учебное пособие. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 134 с.
2. Athans M. The role of modern control theory for automotive engine control // SAE technical paper. – 1978. – 780852.
3. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Nonlinear and adaptive control design. – N.-Y.: John Willey and Sons, 1995. – 563 p.
4. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000. – 549 с., ил. 82. – (Серия «Анализ и синтез нелинейных систем» / под общей редакцией Леонова Г.А. и Фрадкова А.Л.).
5. Никифоров В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – 232 с., ил. 29.

6. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб: Наука, 2003. – 282 с.
7. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 479 с.
8. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 496 с.
9. Ault B.A., Jones V.K., Powell J.D., Franklin G.F. Adaptive air-fuel ration control of a spark ignition engine // SAE paper. – № 940373. – P. 109–118.
10. Kim Y.W, Rizzoni G and Utkin V. Automotive Engine Diagnosis and Control via Nonlinear Estimation // IEEE Control Systems. – October 1998. – P. 84–99.
11. Turin R.C., Geering H.P. Model-Based Adaptive Fuel Control in a SI Engine // SAE paper. – № 940374. – P.119–128.
12. Onder Christopher H. And Geering Hans P. Model-based Multivariable Speed and Air-to-Fuel Ratio Control of an SI Engine // SAE paper. – № 930859.
13. Cook J.A., Sun J., Buckland J.H., Kolmanovsky I.V., Peng H., Grizzle J.W. Automotive powertrain control – A survey // Asian Journal of Control. – 2006. – № 8(3). – P. 237–260.
14. Герасимов Д.Н., Мигуш С.А., Никифоров В.О. Математическая модель инжекторного двигателя внутреннего сгорания // Сборник трудов XXXII научной и учебно-методической конференции. – СПб: СПбГИТМО (ТУ). – 2003. – С. 10–18.
15. Gerasimov D.N. Adaptive observers with improved parametric convergence // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad). – Russia. – Saint-Petersburg: SPbSUITMO, 2004. – P. 95–100.
16. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб: Питер, 2005. – 336 с.: ил. – (Серия «Учебное пособие»).

- Герасимов Дмитрий Николаевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gerasimovdn@mail.ru
- Колюбин Сергей Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ksa\_tau@mail.ru
- Никифоров Владимир Олегович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, проректор, доктор технических наук, профессор, nikiforov@mail.ifmo.ru

УДК 621.314.52

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМИ УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ М.В. Никитина, Д.В. Осипов, В.А. Толмачев

Изложена методика синтеза адаптивной системы управления с цифровыми регуляторами и  $N$ -модульным импульсным усилительно-преобразовательным устройством из условия обеспечения устойчивости в заданном диапазоне изменения параметров силовой цепи и заданного быстродействия при заданном уровне пульсаций тока в нагрузке и ограниченной частоте коммутации силовых ключей.

**Ключевые слова:** адаптивная система управления, цифровой регулятор, анализ устойчивости, параметрический синтез.

### Введение

В настоящее время импульсные усилительно-преобразовательные устройства (УПУ), построенные, в частности, на базе широтно-импульсных преобразователей

(ШИП), находят весьма широкое применение в системах управления различными электротехническими устройствами в силу ряда известных преимуществ. Особую область их применения составляют устройства, статические и динамические характеристики которых определяются свойствами ШИП.

При ограниченной частоте коммутации использование в системе управления  $N$ -модульных УПУ с многофазным принципом синхронизации составляющих ШИП позволяет повысить предельные динамические показатели системы. Технические требования и принципы построения таких систем управления рассмотрены в работе [1].

Современный этап развития преобразовательной техники характеризуется внедрением в информационные подсистемы систем управления микроконтроллеров, реализующих цифровые алгоритмы управления. Применение микропроцессорной техники в системе управления позволяет повысить ее надежность и снизить функциональную сложность. Актуальной является проблема приближения статических и динамических качеств цифровых систем управления к соответствующим качествам эталонных непрерывных систем предельного быстродействия.

В работе [2] сформулирована методика синтеза одноконтурной системы управления источника тока с  $N$ -модульным УПУ и цифровым ПИ-регулятором из условия обеспечения экспоненциального характера переходного процесса с постоянной времени  $T_m$  при максимальной допустимой амплитуде пульсаций тока нагрузки  $\Delta I_d$  в квазистановившемся режиме в диапазоне амплитуд скачкообразных задающих воздействий от 0 до  $I_{z \text{ макс}}$  и заданной частоте коммутации силовых ключей ШИП  $T_k$ .

Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис. 1. Система содержит  $N$  реверсивных ШИП, работающих на общую нагрузку резистивного характера  $R_n$ , и контур регулирования тока нагрузки  $i_n$ . Каждый ШИП содержит силовой каскад мостового типа на четырех транзисторных ключах с напряжением питания  $E_n$  и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), осуществляющий коммутацию силовых ключей с постоянным периодом  $T_k$  по несимметричному закону и обеспечивающий модуляцию первого рода с шагом дискретизации  $T_0$ . Напряжение на нагрузке имеет вид импульсов с амплитудой  $E_n$ , относительной длительностью  $\gamma$ , пропорциональной величине выходного сигнала  $u_y$  цифрового ПИ-регулятора тока (РТ), и полярностью, определяемой полярностью последнего. На входе регулятора осуществляется сравнение напряжения  $U_z$ , пропорционального заданному значению тока нагрузки  $I_z$ , и напряжения  $u_{ос}$ , поступающего с датчика тока ДТ с коэффициентом передачи  $K_{дт}$  и пропорционального истинному значению тока нагрузки. Сглаживание пульсаций тока нагрузки  $i_n$  осуществляется разделительными дросселями каналов с параметрами  $r, L$ .

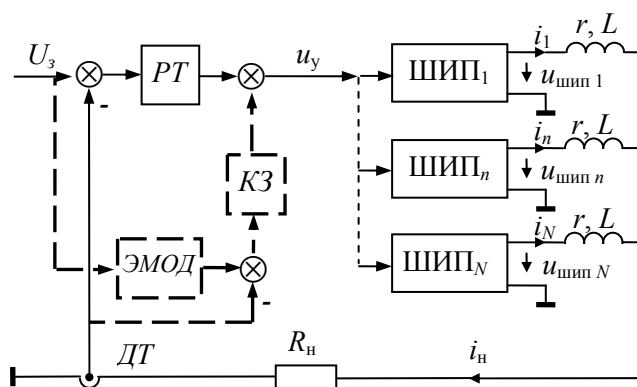


Рис. 1. Структурная схема системы

Уже упомянутая методика синтеза [2] предполагает постоянство параметров силовой цепи. Актуальной является задача сохранения статических и динамических характеристик системы в условиях изменения в процессе эксплуатации как сопротивления на-

грузки  $R_n$ , так и напряжения  $E_n$  источника питания силового каскада ШИП. Решение такой задачи возможно в структурах с адаптивными алгоритмами управления [3].

### Непрерывная модель адаптивной системы управления

Для организации такой системы в структурную схему, представленную на рис. 1, введем дополнительный контур адаптации, содержащий эталонную модель ЭМОД и корректирующее звено КЗ, на вход которого поступает разность выходного напряжения эталонной модели и напряжения датчика тока нагрузки. Выходной сигнал корректирующего звена поступает на вход ШИП, суммируясь с выходным напряжением цифрового ПИ-регулятора основного контура.

Используя подход к реализации адаптивных систем, описанный в работе [3], выбираем в качестве ЭМОД –  $W_3(p) = 1/[K_{дт} \cdot (T_m \cdot p + 1)]$ , в качестве КЗ –  $W_k(p) = K_a \cdot W_R(p)$ , где  $W_R(p)$  – передаточная функция регулятора в эквивалентной непрерывной одноконтурной системе,  $K_a$  – коэффициент адаптации. Тогда структурная схема эквивалентной непрерывной модели системы примет вид, показанный на рис. 2.

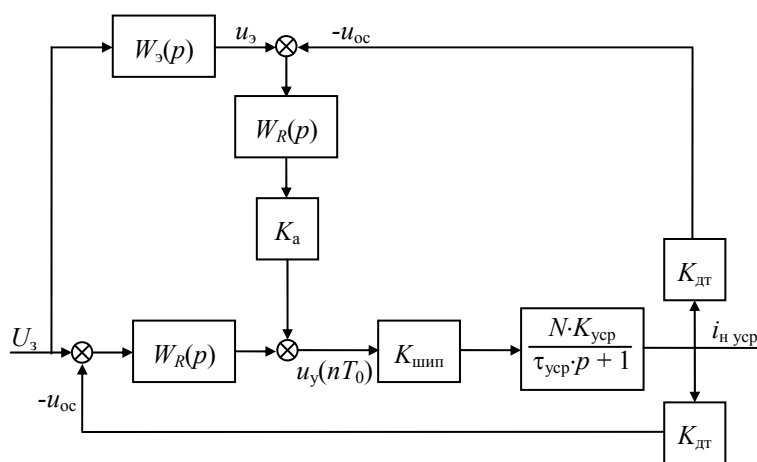


Рис. 2. Эквивалентная непрерывная модель

В представленной модели, составленной относительно усредненных гладких составляющих напряжений и токов, коэффициенты  $K_{шип}$ ,  $K_{уср}$  и  $\tau_{уср}$  определяются как

$$K_{шип} = E_n / U_{оп}, K_{уср} = 1 / (r + N \cdot R_n), \tau_{уср} = L / (r + N \cdot R_n), \quad (1)$$

где  $U_{оп}$  – амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИП.

В работе [3] показано, что при неизменных параметрах силовой цепи ( $R_n$  и  $E_n$ ) передаточная функция системы соответствует эталонной при любом значении коэффициента  $K_a$ . При изменении параметров силовой цепи и достаточно высоком значении коэффициента  $K_a$  динамические характеристики адаптивной системы приближаются к соответствующим характеристикам эталонной модели  $W_3(p)$ . Таким образом, точность поддержания эталонного экспоненциального процесса в условиях изменения параметров силовой цепи связана с предельным значением  $K_a_{пр}$  коэффициента  $K_a$ .

### Методика синтеза адаптивной системы управления

Одной из задач синтеза адаптивной системы с выбранной структурой является такой выбор настроек регуляторов, чтобы в процессе изменения параметров силовой цепи при выбранном предельном значении коэффициента  $K_a$  не происходило нарушение условий ее устойчивости. В работе [2] показано, что при выборе параметров регулятора основного контура на основе соотношений

$$\alpha = \frac{1}{K_{\text{ШИП}} \cdot K_{\text{уср}} \cdot N \cdot K_{\text{дт}}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{\text{уср}}}}, \quad (2a)$$

$$\beta = \frac{-e^{-T_0/T_m}}{K_{\text{ШИП}} \cdot K_{\text{уср}} \cdot N \cdot K_{\text{дт}}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{\text{уср}}}}, \quad (2б)$$

минимально допустимое значение постоянной времени  $T_m$  реализуемого экспоненциального процесса определяется условиями устойчивости системы. В соотношениях (2)  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры дискретного ПИ-регулятора, описываемого известным уравнением [4]  $U_y(n) = U_y(n-1) + \alpha \cdot \varepsilon(n) + \beta \cdot \varepsilon(n-1)$ ;  $\varepsilon(n)$ ,  $\varepsilon(n-1)$ ,  $U_y(n)$ ,  $U_y(n-1)$  – сигналы рассогласования и сигналы регулятора, вычисленные в дискретные моменты времени.

Даже в случае, если параметры процессов в замкнутой непрерывной системе соответствуют эталонным, в системе с ШИП и дополнительным контуром адаптации изменяются границы устойчивости относительно условий в исходной системе, поскольку появляется дополнительная обратная связь, по которой пульсации тока нагрузки поступают на вход ШИМ. Анализ устойчивости в таких системах является сложной задачей. Для ее решения были разработаны алгоритмы определения границ устойчивости, основанные на методе точечных отображений [5]. На основе этих алгоритмов был разработан программный комплекс, позволяющий строить зависимости  $K_{\text{а пр}}$  от изменяемых параметров [6] и токов задания. Минимальное из значений этих коэффициентов в области изменяемых параметров принимается в качестве  $K_{\text{а}}$  в адаптивной системе.

Другим немаловажным фактором при синтезе рассматриваемых систем является выбор точки настройки регуляторов системы, обеспечивающей точность воспроизведения эталонного переходного процесса. В уже не раз упомянутой работе [3] показано, что параметры регуляторов следует рассчитывать при максимально возможном сопротивлении нагрузки и минимально возможном напряжении силового источника.

Параметрический синтез рассматриваемых систем состоит в таком выборе числа модулей  $N$ , индуктивностей разделительных дросселей  $L$ , параметров цифровых ПИ-регуляторов тока  $\alpha$  и  $\beta$ , предельного значения коэффициента адаптации  $K_{\text{а}}$ , чтобы был обеспечен допустимый уровень пульсаций тока в нагрузке, экспоненциальный переходной процесс с постоянной времени  $T_m$  во всем диапазоне токов задания (от 0 до  $I_{\text{з макс}}$ ) и диапазоне изменения параметров силовой цепи.

Основу предлагаемой методики синтеза составляют два соотношения, связывающие между собой вышеперечисленные параметры [2]:

$$\beta_L = \frac{r + R_H}{2Nr} \cdot \left[ \ln \frac{r + R_H + \chi_{\text{доп}} \cdot (r + NR_H)}{r + R_H - \chi_{\text{доп}} \cdot (r + NR_H)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\beta_L = \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{з макс}}} \cdot \frac{N \cdot (r + R_H)}{r} \cdot \left( \frac{T_m}{T_K} + 0,5 \right) - \frac{r + NR_H}{2r}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{макс}} = E_{\text{п}} / (R_H + r)$ ,  $\chi_{\text{доп}} = 2 \cdot \Delta I_{\text{д}} / I_{\text{макс}}$ ,  $\beta_L = L / (r \cdot T_K)$ .

Совместное решение уравнений (3) и (4) определяет требуемые  $N$  и  $L$ , далее по формулам (2) с учетом (1) определяются параметры цифровых ПИ-регуляторов, после чего строятся зависимости предельного значения коэффициента адаптации в области измеряемых параметров. Минимальное из всех возможных значений предельного коэффициента адаптации выбирается в качестве  $K_{\text{а}}$ .

### Пример синтеза адаптивной системы управления

Для примера синтезируем систему с параметрами:  $E_{\text{п}}$  – от 45 В до 55 В,  $U_{\text{оп}} = 10$  В,  $r = 0,03$  Ом,  $R_H$  – от 0,02 Ом до 0,03 Ом,  $T_K = 1$  мс,  $K_{\text{дт}} = 0,2$  В/А,  $\Delta I_{\text{д}} = 5$  А,



$T_m = T_k = T_0$ ,  $I_{3 \text{ макс}} = 50$  А. Согласно предложенной методике,  $E_{пн} = 45$  В,  $R_{пн} = 0,3$  Ом (точка настройки), тогда совместное решение уравнений (3) и (4) дает  $N = 1$ ,  $L = 1,123$  мГн, и по формулам (2)  $\alpha = 0,91$ ,  $\beta = -0,679$ .

На рис. 3, а–в, представлены зависимости предельного значения коэффициента адаптации от изменяемых параметров силовой цепи и различных токах задания, полученные с помощью программного комплекса [6]. Как видно из графиков, минимальное значение коэффициента адаптации  $K_a^* = 1,58$ .

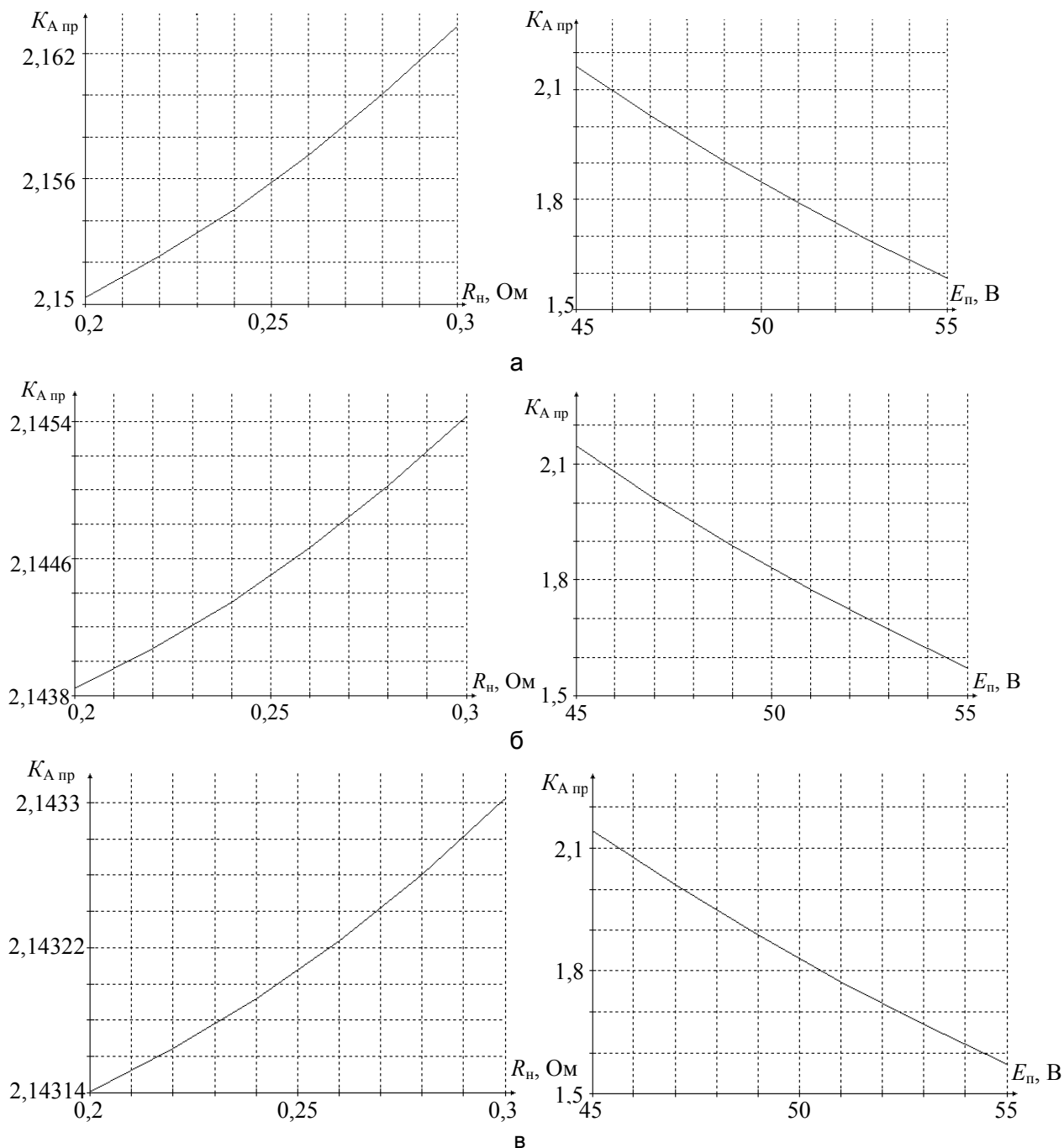


Рис. 3. Зависимости  $K_{a \text{ пр}}$  при: а –  $I_3 = 50$  А, б –  $I_3 = 5$  А; в –  $I_3 = 0,5$  А

На рис. 4 показаны результаты математического моделирования процессов при реакции синтезируемой системы на скачок задающего воздействия. Здесь  $i_3$  – эталонная кривая,  $i_{п1}$  – кривая тока нагрузки, соответствующая расчетным параметрам силовой цепи и регуляторов при  $K_a = 0$ ,  $i_{п2}$ ,  $i_{п3}$  – кривые тока нагрузки, соответствующие расчет-

ным параметрам регуляторов и отличным от расчетных значениях параметров силовой цепи соответственно при  $K_a = 0$  и  $K_a = 1,58$ ,  $u_y$  – кривая напряжения, поступающего на вход ШИП,  $u_{оп}$  – кривая опорного напряжения ШИП,  $u_{шип}$  – кривая выходного напряжения ШИП. Кривая тока нагрузки  $i_{н3}$  близка к эталонному экспоненциальному процессу, отличаясь лишь на величину пульсаций тока в переходном и квазистатическом режимах, не превышающую допустимого значения.

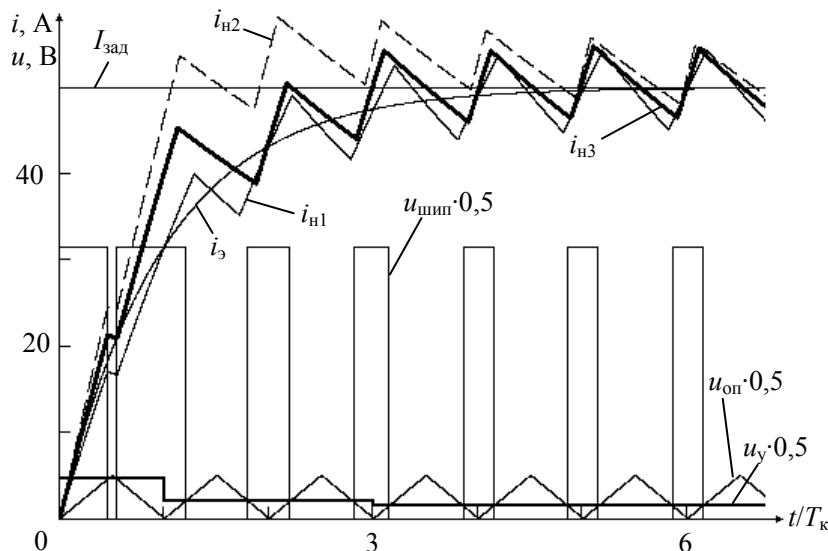


Рис. 4. Результаты моделирования

### Выводы

1. Сохранение заданных динамических качеств системы управления регулируемого источника тока с транзисторным ШИП в условиях изменяющихся параметров силовой цепи возможно при введении дополнительного контура сигнальной адаптации с эталонной моделью в виде апериодического звена первого порядка с заданной постоянной времени  $T_m$  и ПИ-регулятором.

2. Параметрический синтез адаптивной системы управления можно производить, используя известную методику [2], если в качестве исходных параметров принять максимальное из возможных значений сопротивления нагрузки и минимальное из возможных значений напряжения силового источника питания.

3. Значение коэффициента адаптации целесообразно определять на основе зависимостей предельного значения коэффициента адаптации  $K_{а пр}$  от изменяемых параметров, полученных с использованием методики, приведенной в работе [5], и программного комплекса, описанного в работе [6].

Следует отметить, что приведенная в данной работе методика синтеза позволяет выбирать параметры элементов энергетической и информационной подсистем из условия обеспечения заданного быстродействия при допустимом уровне пульсаций тока в нагрузке, заданной частоте коммутации силовых ключей и заданном диапазоне изменения параметров силовой цепи.

### Литература

1. Сеницын В.А., Толмачев В.А., Томасов В.С. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с произвольной формой выходного параметра // Изв. вузов. Приборостроение. – 1999. Т. 39. – № 4. – С. 47–54.

2. Толмачев В.А., Кротенко В.В., Никитина М.В. Синтез цифровой систем управления источником тока с многофазным усилительно-преобразовательным устройством // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Выпуск 15. Теория и практика современных технологий. – С. 330–334.
3. Толмачев В.А., Никитина М.В. Адаптивная система управления многомодульного источника тока с индуктивным сглаживающим фильтром // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 48–53.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984.
5. Толмачев В.А., Осипов Д.В. Анализ устойчивости к автоколебаниям на субгармонических частотах импульсных источников тока программируемой формы // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). – 2001. – Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. – С. 132–136.
6. Осипов Д.В. Программный комплекс для анализа устойчивости систем автоматического регулирования тока с широтно-импульсными преобразователями // Современные технологии: сборник научных статей / под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – С.267–276.

<i>Никитина Мария Владимировна</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nikitina@ets.ifmo.ru
<i>Осипов Дмитрий Владимирович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, osipov77@mail.ru
<i>Толмачев Валерий Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tolmachov@ets.ifmo.ru

УДК 519.24

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ К ТРИБОЛОГИЧЕСКИМ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИМ СИГНАЛАМ**

**В.М. Мусалимов, О.Е. Дик, А.Е. Тюрин**

Рассматривается задача анализа нестационарных сигналов, полученных при различных экспериментальных условиях. Предложен новый метод оценивания параметров спектральной плотности энергии сигнала и его детализирующих компонентов, полученных при дискретном вейвлет-разложении сигнала. Эффективность метода проверена при исследовании профилограмм поверхностей металлических образцов и кинетического тремора, возникающего при поддержании изометрического усилия руки человека. Анализ параметров для профилограммы позволяет выявить энергетическую структуру слоев поверхности трения, а для тремора – достоверно различать процессы поддержания усилия руки здорового человека и больного с нарушениями двигательной активности.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, спектральная плотность энергии сигнала, кумулята, параметры действия.

### **Введение**

Вейвлет-преобразование широко используется для решения широкого класса задач, связанных с подавлением шумов, сжатием больших объемов информации, анализом геофизических полей и сигналов, анализом электрокардиограмм, рентгенограмм и томограмм мозга [1–3]. С подобными задачами сталкиваются, например, в трибологии при изучении процессов трения и изнашивания. Так, при создании модели трения необходимо учитывать множество влияющих факторов (физические и химические свойства поверхностей, загрязнения, упрочнения и др.), наиболее значимые из которых оп-

ределяют функциональные свойства поверхностей [4]. Стандартные критерии, такие как  $Ra$ ,  $Rz$  [5] для различных профилей, могут иметь одинаковые значения, в то время как функциональные свойства, проявляющиеся при трении этих поверхностей, могут значительно отличаться.

Эти технологии используются при анализе кинетического тремора, возникающего в процессе поддержания изометрического усилия руки здорового человека и больного с нарушением двигательной активности [6]. Нормальный физиологический тремор характеризуется частотами в пределах 8–12 Гц и малой амплитудой, практически невидимой невооруженным глазом [7]. Изометрические усилия, стресс и усталость приводят к увеличению амплитуды тремора через периферические адренорецепторы, вызывающие возрастающую синхронизацию моторных волокон [8]. Эластическая нагрузка пальцев рук здорового человека требует тщательного контроля положения пальцев. В этих условиях к колебаниям диапазона 10 Гц добавляется тремор диапазонов 20 и 40 Гц [9]. Исследования паркинсонического тремора также подтверждают, что различным частотам соответствуют специфические уровни управления движениями, так как у больных с синдромом паркинсонизма наблюдается патологический тремор с частотой 3–6 Гц и отсутствуют частоты, превышающие 15 Гц [10]. После введения противопаркинсонических препаратов, уменьшающих паркинсонические симптомы, у этих больных возникает тремор на частоте 40 Гц, исчезающий после отмены препаратов, подтверждая, что высокочастотная нейрональная активность играет некоторую роль в управлении движениями, и эта активность нарушается при паркинсонизме [9]. Тремор, возникающий в процессе поддержания изометрического усилия руки, т.е. без движения пальцев в пространстве, различается по амплитуде для здорового и больного человека, но незначительно отличается по частоте в диапазоне 5–12 Гц, порождая трудности в различении частотных спектров.

Цели настоящей работы: 1) предложить метод оценки спектральной плотности энергии нестационарного сигнала; 2) проверить эффективность метода при исследовании динамической системы – шероховатости поверхности трения металлических материалов и кинетического тремора, возникающего в процессе поддержания изометрического усилия руки здорового человека и больного с синдромом паркинсонизма.

## 1. Методы исследования

### 1.1. Исследование шероховатости поверхности трения

Исследуемый сигнал – профилограмма, которая представляет собой дискретный ряд значений пиков и впадин рельефа. Для каждого из пяти образцов одномерный сигнал содержал 3500 отсчетов с 1,75 мм поверхности. За одну секунду профилограф проходил 0,25 мм поверхности, записывая новое значение через каждые 0,5 мкм с частотой дискретизации 1000 Гц.

В качестве исследуемого материала использовался латунный сплав ЛС59. Поверхность образцов была отшлифована до шероховатости  $Ra=0,22$ . С помощью профилографа записывался профиль поверхности образцов до и после процессов трения, смоделированных для металла ЛС59. Испытуемые образцы осуществляют возвратно-поступательное движение относительно друг друга, при этом можно изменять скорость относительного перемещения образцов и величину нагружения – силу взаимодействия, меняя тем самым интенсивность трения или износа.

### 1.2. Исследование кинетического тремора

Эксперименты были проведены на 9 здоровых испытуемых в возрасте от 40 до 52 лет и 9 больных с синдромом паркинсонизма в возрасте от 51 до 58 лет. Испытуемые сидели за столом перед монитором и нажимали пальцами выпрямленных рук на платформы с тензочувствительными датчиками, которые преобразовывали силу давления

каждой руки в электрический сигнал. Жесткость платформ обеспечивала регистрацию усилия в изометрическом режиме, т.е. без движения пальцев в пространстве. Длительность регистрации составляла 30 с, частота дискретизации – 100 Гц. Регистрируемая траектория изометрического усилия содержала медленный тренд и быструю произвольную компоненту (тремор). Эта компонента была выделена из полученной траектории с помощью процедуры MATLAB, которая использует пороговую обработку вейвлет-коэффициентов по принципу Штейна (несмещенной оценки риска).

### 1.3. Вейвлет-преобразование и кратномасштабный анализ [11, 12]

Для дискретного сигнала  $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$  конечной длины  $N$  вейвлет-преобразование вычисляется для дискретных значений параметров масштаба  $a=2^j$  и сдвига  $b=k \cdot 2^j$ , где  $k, j$  – целые числа, а семейства вейвлетов и масштабирующих функций имеют вид

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t}{2^j} - k\right), \quad \phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \phi\left(\frac{t}{2^j} - k\right).$$

Тогда дискретное преобразование сигнала на  $j$ -уровне разложения представляет собой суперпозицию вейвлетов и масштабирующих функций:

$$W_j = \sum_{k_0}^{K_{\max}} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{k_0}^{K_{\max}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad k_{\max} \leq 2^j - 1, \quad j = 0, 1, \dots, m, \quad m = \text{float}(\log_2 N)$$

Для вычисления вейвлет-коэффициентов  $a_{j,k}$  и коэффициентов при масштабирующих функциях  $d_{j,k}$ , которые задаются интегралами

$$a_{j,k} = \int x(t) \phi_{j,k}^*(t) dt, \quad d_{j,k} = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt,$$

используется каскадный алгоритм [13], а для восстановления сигнала по известному набору коэффициентов – каскадный алгоритм обратного вейвлет-преобразования. В итоге анализируемый сигнал равен сумме сглаженной компоненты последнего уровня ( $A_m$ ) и деталей всех уровней ( $D_m, \dots, D_1$ ):

$$x(t_i) = A_m(t_i) + D_m(t_i) + \dots + D_1(t_i) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} a_{m,k} \phi_{m,k}(t) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=0}^{k_{\max}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t).$$

Для анализа полученных компонент сигнала обычно используется быстрый алгоритм дискретного преобразования Фурье с последующим оцениванием спектральной плотности энергии этих компонент.

### 1.4. Метод оценки энергетических характеристик спектральной плотности энергии нестационарного сигнала

Найденные компоненты сигнала  $D_m, \dots, D_1$  в явной форме не несут информации о характеристиках процесса. Для получения данных об энергетических характеристиках процесса используем методы цифрового спектрального анализа [14]. Спектр сигнала показывает распределение амплитуды сигналов по частотам. Для получения спектра использован алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Спектральная плотность энергии сигнала равна квадрату Фурье-преобразования сигнала,  $E(f) = |X(f)|^2 = \left| \int x(t) e^{-2\pi i f t} dt \right|^2$ , где  $X(f)$  – спектр сигнала, и описывает распределение энергии сигнала по частоте. Накопление спектральной плотности энергии, называемое полной энергией сигнала, в пределах полосы частот  $(f_1, f_2)$  определяется интегралом

$$E = \int_{f_1}^{f_2} E(f) df.$$

Полная энергия определяет количественное значение энергии, распределенной по всему спектру. Для дискретного сигнала  $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$  полная энергия представляет собой сумму

$$C = \sum_{i=0}^N |E(f)_{i+1} - E(f)_i|,$$

где  $E(f)_i$  – спектральная плотность энергии, соответствующая дискретному значению  $x(t)_i$  и частоте  $f_i$ . Примеры графиков спектральной плотности энергии и накопления энергии представлены на рис. 1, а, б.

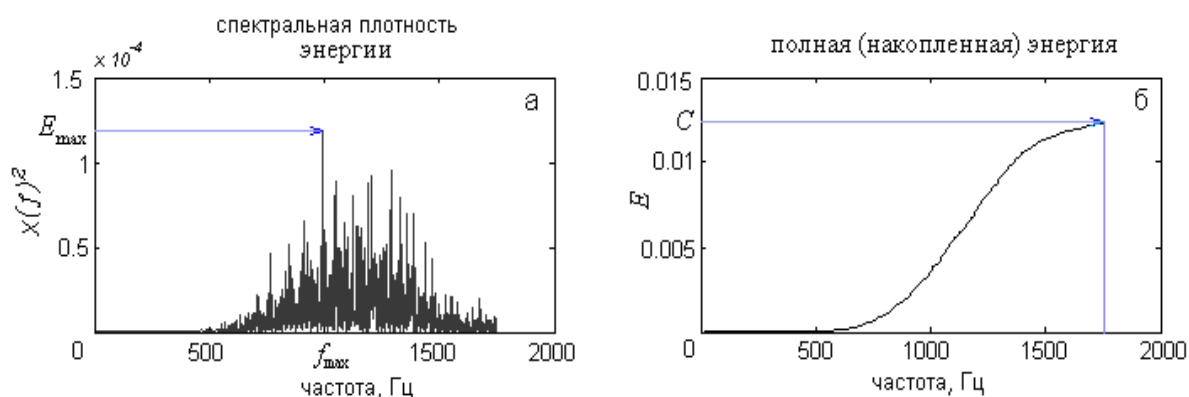


Рис. 1. Примеры графиков спектральной плотности энергии и накопленной энергии:  $E_{\max}$  – максимальное значение спектральной плотности энергии,  $f_{\max}$  – соответствующее ему значение частоты,  $C$  – предельное значение кумуляты

Обозначим через  $E_{\max}$  максимальное значение спектральной плотности энергии, а через  $f_{\max}$  – значение частоты, соответствующее максимальному значению спектральной плотности. Обозначим через  $C$  значение полной энергии, соответствующее максимальному накоплению энергии (рис. 1, б). В качестве энергетических характеристик спектральной плотности энергии рассмотрены следующие величины:

$$h_1 = \frac{C}{(f_2 - f_1)f_{\max}}, \quad h_2 = \frac{E_{\max}}{f_{\max}}.$$

Параметр  $h_1$  определяет связь между уровнем максимального накопления энергии сигнала, отнесенного к частоте, соответствующей максимальному значению спектральной плотности энергии, и интервалом частот, на котором накоплена энергия. Параметр  $h_2$  описывает отношение максимального значения спектральной плотности энергии к соответствующему значению частоты. При дискретном вейвлет-разложении анализируемый сигнал (профилограмма или кинетический тремор) был равен сумме сглаженной компоненты последнего, шестого уровня ( $A_6$ ) и деталей всех уровней ( $D_6, \dots, D_1$ ). В качестве материнского вейвлета был использован вейвлет Добеши  $db4$  с центральной частотой  $Fr=0,7143$  Гц. Частота, соответствующая  $j$ -му уровню разложения, вычислялась по формуле  $Fr_j = \frac{f_r f_s}{2^j}$ ,  $j = 0, \dots, 6$ , где  $j$  – частота дискретизации. На каждом уровне разложения отфильтровывались частоты, превышающие значение  $Fr_j$ .

## 2. Результаты обработки профилограмм

Профилограмма, записанная с поверхности образцов до взаимодействия, представлена на рис. 2, а. Рис. 2, б отражает профиль нижнего образца после взаимодействия, а рис. 2, в – профиль верхнего образца после взаимодействия. Значения стандартных характеристик приведены в табл. 1.



Рис. 2. Профилограмма, записанная с поверхности образцов: а – профилограмма до взаимодействия, б – профилограмма нижнего образца после взаимодействия, в – профилограмма верхнего образца после взаимодействия

стандартные характеристики	пара трения		пара трения		исходный профиль
	нижний	верхний	нижний	верхний	
$Ra$ , мкм	0,63	1,41	1,14	2,25	0,22
$Rz$ , мкм	2,95	6,26	6,62	8,97	1,23

Таблица 1. Стандартные параметры оценки профилограмм

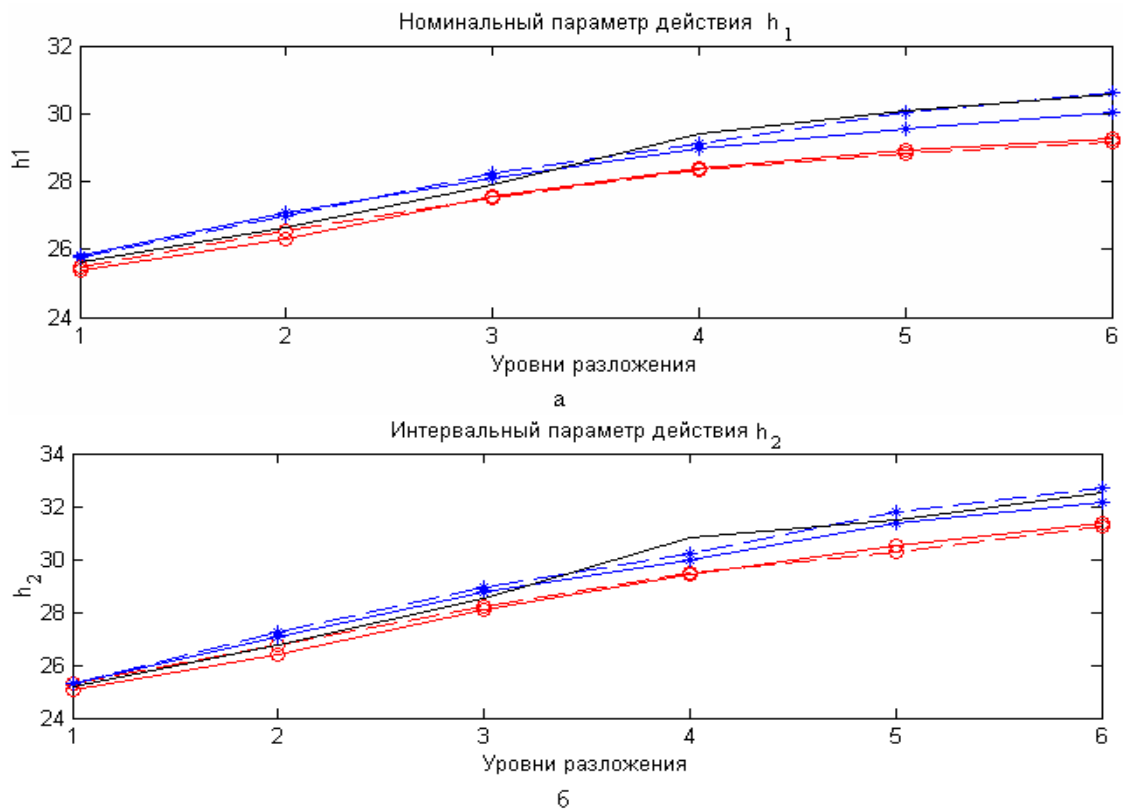


Рис. 3. Зависимости энергетических параметров от уровня разложения: а – номинальный параметр действия, б – интервальный параметр действия; сплошная линия – для исходного профиля, (о): штрихпунктирная линия – верхняя поверхность, сплошная линия – нижняя поверхность; (\*): штрихпунктирная линия – верхняя поверхность, сплошная линия – нижняя поверхность

Процессы трения напрямую связаны с явлениями диссипации энергии – в первую очередь, с разрушением устойчивой поверхностной структуры и захватом все новых слоев вглубь поверхности. Представление сигнала профиля на разных частотах подразумевает рассмотрение разных слоев поверхности. Первый уровень соответствует «микрошероховатости» и получен на частоте 732 Гц, остальные слои рассматривают меньшие детали рельефа, соответствующие меньшим частотам. Графики зависимостей параметров  $h_1$  и  $h_2$  от уровня разложения приведены на рис. 3, а, б.

Значения коэффициентов в логарифмическом масштабе соответствуют энергии каждого уровня поверхности. Энергии верхних и нижних образцов различаются на порядок, что соответствует неравномерному износу верхнего и нижнего образцов: нижний образец истирается быстрее. Прослеживается разброс энергий на разных уровнях, что соответствует различному влиянию компонент рельефа в процессе трения.

Эти графики позволяют оценить различие в константах  $h_1$  и  $h_2$ . Параметр  $h_2$  характеризуется большей информативностью в рассмотрении энергий более низкого порядка и показывает более точное изменение энергии, характерное для микроуровней верхних и нижних образцов.

### 3. Результаты обработки физиологического и паркинсонического тремора

Примеры быстрой произвольной компоненты (тремора) траектории изометрического усилия, полученные для здорового человека и больного с синдромом паркинсонизма до и после введения антипаркинсонического препарата Levodopa, приведенные на рис. 4, демонстрируют двухкратные отличия по амплитуде для здорового и больного человека и отсутствие видимых отличий по частоте.

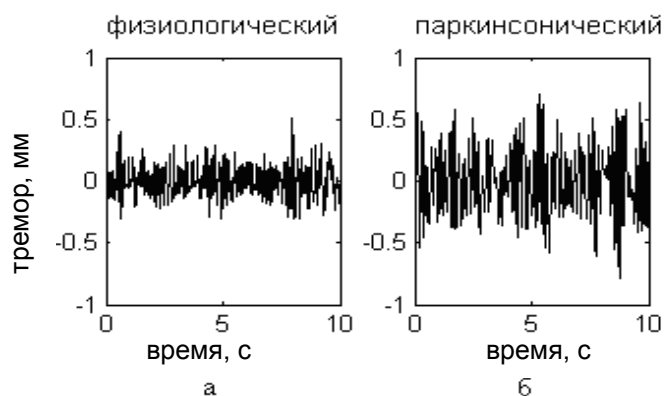


Рис. 4. Примеры тремора траектории изометрического усилия, полученные для здорового человека и больного с синдромом паркинсонизма

Средние по девяти испытуемым значения энергетических параметров  $h_1$  и  $h_2$  в полулогарифмическом масштабе представлены в зависимости от уровня разложения на рис. 5, а, б. Оба параметра возрастают на каждом последующем уровне разложения. Для здоровых испытуемых средние значения  $h_1$  и  $h_2$  меньше значений, полученных для больных. Наибольшие (на два порядка) отличия наблюдаются на втором уровне разложения, т.е. для высокочастотных деталей. При возрастании уровня разложения низкочастотные детали отличаются меньше. Через 1 час после введения антипаркинсонического препарата Levodopa средние значения  $h_1$  и  $h_2$  для больных уменьшаются на всех уровнях разложения.

Таким образом, предложенные энергетические характеристики «чутко улавливают» изменения в состоянии человека и могут служить критерием отличия спектральной плотности энергии детализирующих компонент разложения практически неотличимых исходных сигналов.



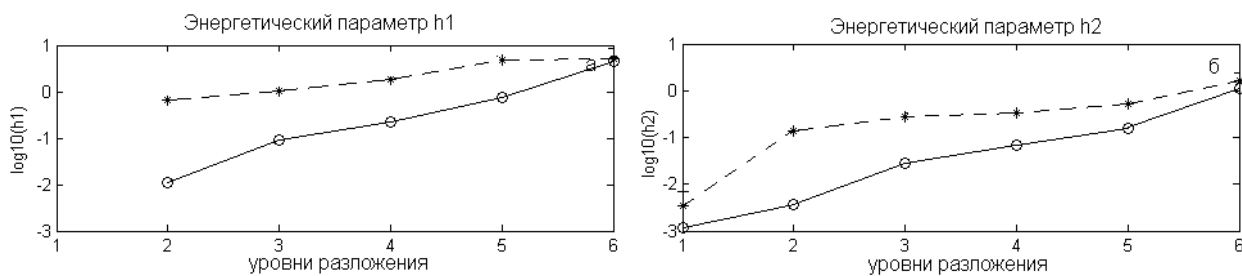


Рис. 5. Зависимости энергетических параметров от уровня разложения:  
 а – номинальный параметр действия, б – интервальный параметр действия; сплошная линия – для здоровых испытуемых, штрихпунктирная – для больных

### Заключение

1. Внедрение данного метода исследования в анализ профилограмм позволяет, используя лишь анализ профилограммы, записанной с поверхности образца, исследовать внутреннюю энергетическую структуру поверхности трения.
2. Определение внутренней энергетической структуры поверхности позволит в будущем оптимизировать применение методов обработки поверхностей трущихся деталей в механизмах и приборах, а также выявить уровни поверхности, изменяющиеся в процессе трибовзаимодействия наиболее сильно.
3. Каждому из уровней разложения можно поставить в соответствие слой поверхности (например, слой загрязнений, адсорбированный газ, окислы, слой упрочнения, подложка) и проследить взаимовлияние этих слоев.
4. Энергетические параметры позволяют не только достоверно различать энергетические спектры детализирующих компонент вейвлет-разложения кинетического тремора, возникающего в процессе поддержания изометрического усилия руки здорового человека и больного с нарушениями двигательной активности, но и сопоставить изменение состояния больного, связанное с лекарственным облегчением паркинсонических симптомов, с уменьшением значений этих параметров.

### Литература

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – № 166. – С. 1145–1170.
2. Crowe J.A., Gibson N.M., Woolfson M.S., Somekh M.G. Wavelet transform as a potential tool for ECG analysis and compression // J. of Biomedical Scientific Instruments. – 1994. – № 30. – P. 63–68.
3. Бойцов С.А., Гришаев С.Л., Солнцев В.Н., Кудрявцев Ю.С. Анализ сигналусредненной ЭКГ (по данным вейвлет-преобразования) у здоровых и больных ИБС // Вестник аритмологии. – 2001. – № 23. – С. 32–36.
4. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
5. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
6. McAuley J. H., Marsden C.D. Physiological and pathological tremors and rhythmic central motor control // Brain. – 2000. – Vol. 123. – № 8. – P. 1545–1567; Elble R. Physiologic and essential tremor // Neurology. – 1986. – № 36. – P. 225–31.
7. Hagbarth K-E, Young RR. Participation of the stretch reflex in human physiological tremor // Brain. – 1979. – № 102. – P. 509–26.

8. McAuley JH, Rothwell JC, Marsden CD. Frequency peaks of tremor, muscle vibration and electromyographic activity at 10 Hz, 20 Hz and 40 Hz during human finger muscle contraction may reflect rhythmicities of central neural firing // Exp. Brain. Res. – 1997. – № 114. – P. 525–41.
9. Brown P, Corcos DM, Rothwell JC. Does parkinsonian action tremor contribute to muscle weakness in Parkinson's disease? // Brain. – 1997. – № 120. – P. 401–408.
10. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М., 2005.
11. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Техносфера, 2006.
12. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
13. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой и спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.:Мир, 1990. – 584 с.

<i>Мусалимов Виктор Михайлович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, musVM@yandex.ru
<i>Дик Ольга Евгеньевна</i>	–	Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, старший научный сотрудник, glazov.holo@mail.ioffe.ru
<i>Андрей Евгеньевич Тюрин</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр, andrey4t5@rambler.ru, 89626830037

УДК 004.41

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

**В.В. Соснин**

В работе с помощью имитационного моделирования анализируются свойства многоканальных систем с эквивалентной суммарной производительностью. Детально исследуется влияние параметров входящего потока заявок на среднее время пребывания заявок в системе.

**Ключевые слова:** теория очередей, многоканальные системы массового обслуживания, неэкспоненциальные законы распределения, оценка эффективности, имитационное моделирование.

### Введение

При проектировании компьютерных систем и сетей широко применяются модели массового обслуживания. При этом моделями отдельных устройств и узлов в общем случае служат системы массового обслуживания (СМО) типа G/G/N (в символике Кендалла [1, с. 107]). В такой системе на обработку к  $N$  приборам одинаковой производительности поступает произвольный поток заявок, а время обслуживания в каждом приборе описывается произвольным законом распределения (ЗР). Под производительностью прибора понимается интенсивность обслуживания заявок. При  $N > 1$  система называется многоканальной. Зададим для случая  $N = 1$  некоторое значение производительности  $V_1$  для обрабатывающего прибора. Тогда класс СМО с  $N \geq 1$ , в которых производительность каждого из  $N$  приборов равна  $V_N = V_1/N$ , будем называть *системами с эквивалентной производительностью* (СЭП), так как суммарная производительность всех приборов в них остается постоянной:  $V_\Sigma = V_N \cdot N$ . При этом все СМО из заданного класса СЭП будут одинаково хорошо справляться с нагрузкой, т.е. обеспечат одинаковый уровень загрузки. В литературе [2, с. 82] описываются присущие СЭП свойства:

- 1) с увеличением  $N$  возрастает отказоустойчивость в СЭП (при выходе из строя  $k$  приборов суммарная производительность снижается в  $N/(N - k)$  раз);

- 2) с увеличением  $N$  возрастают накладные расходы на обеспечение взаимодействия между обслуживающими приборами;
- 3) с увеличением  $N$  среднее время ожидания заявок в очереди уменьшается, так как при большем числе приборов большая часть заявок немедленно поступает на обслуживание;
- 4) с увеличением  $N$  среднее время пребывания заявок в СМО увеличивается.

Из пункта 4 этого перечня следует, что для минимизации задержек выгоднее использовать системы с меньшим числом каналов. Это свойство является очень важным при выборе оптимального числа  $N$ , так как время пребывания характеризует эффективность работы СМО в целом. Заметим, что это свойство получено и доказано в результате аналитического моделирования СЭП М/М/Н.

Целью данной работы стало исследование свойств СЭП G/G/N. Применение аналитических методов для этого невозможно, так как при этом понадобилось бы точное задание ЗР входящего потока и ЗР времени обслуживания. Поэтому исследование проводилось на имитационных моделях. В результате многочисленных экспериментов были получены новые свойства СЭП, которые противоречат приведенному выше свойству 4. Таким образом, появилась необходимость более детально исследовать зависимость среднего времени пребывания заявок в системе от числа  $N$  для СЭП с неэкспоненциальными потоками. Для этого в работе решались следующие задачи:

- 1) определение факторов, влияющих на исследуемую характеристику (среднее время обслуживания заявок);
- 2) выявление характера влияния на нее каждого из этих факторов;
- 3) формулирование рекомендаций по оптимизации выбора числа  $N$  при проектировании систем.

Модель СЭП разработана в среде имитационного моделирования GPSS World. В модели предусмотрена возможность варьирования числа приборов и законов распределения времени обслуживания и времени между прибывающими заявками (гамма-распределение, распределение Кокса, экспоненциальное распределение, равномерное распределение).

### Постановка задачи

В качестве примера сравним характеристики двух классов СЭП, М/М/Н и G/G/N, с некоторым заданным набором параметров. На практике бывает удобно рассматривать не конкретный ЗР, а ограничиться указанием лишь первых двух моментов этого закона, так как именно эти два момента оказывают определяющее влияние на характеристики. Поэтому в рассматриваемых системах зададим среднее время между приходом заявок  $T_{\Pi} = 100$  единиц времени, коэффициент загрузки  $K_z = 60\%$ , коэффициент вариации времени обслуживания заявок в приборе ( $KV_{TO}$ ) и коэффициент вариации времени между приходами заявок ( $KV_{\Pi}$ ). Среднее время обслуживания заявок будет определяться в зависимости от  $N$  по формуле  $T_O = K_z \cdot T_{\Pi} \cdot N$ . Очевидно, что две рассматриваемые СЭП будут отличаться только коэффициентами  $KV_{\Pi}$  и  $KV_{TO}$ .

На рис. 1, а представлена зависимость времени пребывания заявок СЭП М/М/Н (теоретический расчет) от числа приборов  $N$ . Принятые обозначения:  $U$  – среднее время пребывания заявки в СМО,  $W$  – среднее время ожидания обслуживания заявки. На рис. 1, б показана аналогичная зависимость для СЭП G/G/N (по результатам имитационного моделирования). Здесь и далее на графиках с результатами экспериментов приводится 95 % доверительный интервал (по Стьюденту) всех измеренных характеристик.

График на рис. 1, а иллюстрирует классический случай, когда с точки зрения минимизации задержек наиболее выгодным является использование одноканальной СМО, так как время пребывания  $U(N)$  монотонно возрастает. Эксперименты показали, что по-

добный характер поведения системы сохраняется при любой загрузке при условии, что  $0 \leq KV_{TO} \leq 1$  и  $0 \leq KV_{TP} \leq 1$ . Однако стоит увеличить оба коэффициента вариации выше этих ограничений, как это правило теряет силу (рис. 1, б): у функции  $U(N)$  теперь наблюдается минимум в точке  $N = 3$ . Этот пример доказывает, что эмпирическое правило о предпочтительности минимизации числа каналов в СЭП нельзя распространять на весь класс систем G/G/N.

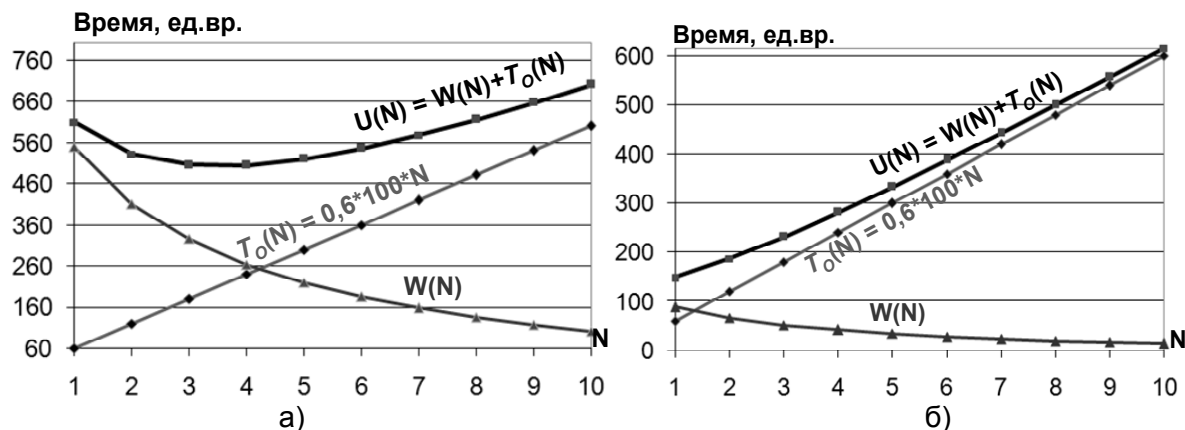


Рис. 1. Зависимость времени пребывания заявок в СЭП от числа приборов:  
а)  $KV_{TO} = 1, KV_{TP} = 1$ ; б)  $KV_{TO} = 3, KV_{TP} = 1,5$

Таким образом, возникает задача оценки влияния на экстремум функции  $U(N)$  следующих параметров:

- 1) коэффициент вариации времен обслуживания заявок в приборе ( $KV_{TO}$ );
- 2) коэффициент вариации времен между приходами заявок ( $KV_{TP}$ );
- 3) коэффициент загрузки СМО ( $Kз$ ).

### Результаты исследования

В работе исследовалось независимое влияние на  $U$  каждого из этих факторов. Ниже приводятся результаты экспериментов, в которых значение исследуемого фактора варьировалось, а значения двух других факторов фиксировались. На рис. 2 приведена зависимость  $U(KV_{TO})$  для трех значений  $N$  при  $T_{П} = 100$  единиц времени,  $KV_{TP} = 1$  и  $Kз = 60\%$ . Для  $N=1$  расчет проводился по формуле Поллячека–Хинчина [3, с. 208]. Для  $N=2$  и  $N=3$  приведен 95%-й доверительный интервал измеренной характеристики. На рисунке  $U_{N=i}$  означает среднее время обслуживания заявки при числе обслуживающих приборов, равном  $i$ . Обозначим через  $N_{opt}$  число приборов, для которого в данном классе СЭП среднее время пребывания заявок является наименьшим. Как видно из рисунка, при  $KV_{TO} < 2$  имеем  $N_{opt} = 1$ , при  $2 < KV_{TO} < 3$  имеем  $N_{opt} = 2$ , при  $KV_{TO} > 3$  имеем  $N_{opt} = 3$ . Очевидно, существует некоторое значение, при превышении которого коэффициентом вариации  $KV_{TO}$  оптимальным числом приборов станет 4, 5, 6 и т.д. Наличие этого эффекта подтверждается многочисленными экспериментами.

На рис. 2 зависимость  $U_{N=1}(KV_{TO})$ , согласно формуле Поллячека–Хинчина, имеет параболический вид:  $U_{N=1}(KV_{TO}) = C_1 \cdot KV_{TO}^2 + C_2$ , где  $C_1$  и  $C_2$  – константы, не зависящие от  $KV_{TO}$ . Расчеты показали, что и две другие зависимости ( $U_{N=2}(KV_{TO})$  и  $U_{N=3}(KV_{TO})$ ) имеют с критерием достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,999$  аналогичный вид, с разницей лишь в значении констант  $C_1$  и  $C_2$ . Знание общего вида этой зависимости позволяет использовать следующий алгоритм анализа систем с неизвестным  $KV_{TO}$ :

- 1) на имитационной модели найти несколько пар значений  $U_{N=2}$  и  $KV_{TO}$ , а также  $U_{N=3}$  и  $KV_{TO}$  при малых значениях  $KV_{TO}$  (так как именно при малых значениях этого коэф-

- фициента вариации получаемые характеристики достаточно точны, т.е. имеют узкий доверительный интервал);
- 2) по найденным парам найти аппроксимирующие функции  $U_{N=2}(KV_{TO})$  и  $U_{N=3}(KV_{TO})$  – в этом случае аппроксимирующие функции будут определены даже точнее, чем если бы они искались, в том числе, и по известным парам значений с высоким  $KV_{TO}$ , приводящим к значительному разбросу в значении получаемых характеристик;
  - 3) решить уравнение  $U_{N=2}(KV_{TO}) = U_{N=3}(KV_{TO})$  относительно  $KV_{TO}$ ;
  - 4) проделать пункты 1–3 для достаточного числа последующих пар ( $U_{N=3}(KV_{TO}) = U_{N=4}(KV_{TO})$ ,  $U_{N=4}(KV_{TO}) = U_{N=5}(KV_{TO})$  и т.д.).

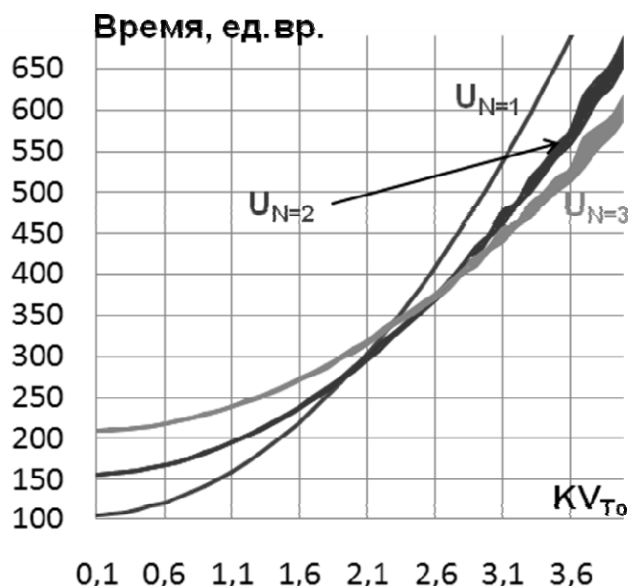


Рис. 2. Зависимость времени пребывания заявок в СЭП от  $KV_{TO}$

В результате будут найдены значения  $KV_{TO}$ , являющиеся границами изменения значения  $N_{opt}$ . Полученные данные удобно использовать при проектировании рассматриваемого класса систем.

На рис. 3 приведена зависимость  $U(KV_{ТП})$  для трех значений  $N$  при  $T_{П} = 100$  единиц времени,  $KV_{TO} = 2$  и  $Kz = 60\%$ . Каждая из  $U_{N=i}$  представлена двумя графиками, задающими нижнюю и верхнюю границу 95 %-го доверительного интервала. Очевидно, что ситуация похожа на предыдущую: здесь также наблюдаются точки пересечения, т.е. смена значения  $N_{opt}$ . По рисунку можно с уверенностью сказать, что при  $KV_{ТП} < 2$  получаем  $N_{opt} = 1$ , а при  $KV_{ТП} > 2$  получаем  $N_{opt} > 1$ .

При исследовании фактора  $KV_{ТП}$  было замечено, что вообще-то наличие точек пересечения зависит от выбранного значения  $KV_{TO}$  (он должен быть больше некоторого числа из промежутка 1–2), тогда как при варьировании самого  $KV_{TO}$  такой зависимости от других факторов не отмечено.

По аналогии с предыдущим случаем для каждого из  $U_{N=i}$  была получена аппроксимирующая функция. Оказалось, что с критерием достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,999$  для всех трех случаев она имеет вид  $U_{N=i} = C_3 \cdot KV_{ТП}^2 + C_4 \cdot KV_{ТП} + C_5$  с разницей лишь в константах  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ , которые не зависят от  $KV_{ТП}$ . Очевидно, что полученная закономерность может быть использована аналогичным образом (можно, например, чисто аналитически узнать значение  $KV_{ТП}$ , при котором  $N_{opt} = 3$ , так как определить это по рисунку нельзя из-за перекрытия границ доверительных интервалов  $U_{N=2}$  и  $U_{N=3}$ ).

Рассмотрим, наконец, зависимость  $U(Kз)$ , которая представлена на рис. 3. На этом рисунке  $T_{П} = 100$  единиц времени,  $KV_{ТП} = 1$ ,  $KV_{ТО} = 2,5$ . Снова видим схожую с предыдущими ситуацию: после некоторого значения варьируемого фактора более выгодным становится использовать СМО с большим числом обслуживающих приборов (на рис. 3 при  $Kз > 0,25$  выгоднее использовать 3 прибора, чем 1). Однако и для  $Kз$  была замечена зависимость наличия точек смены  $N_{opt}$  от выбранного значения  $KV_{ТО}$ . Таким образом, независимое влияние оказывает только  $KV_{ТО}$ , а два других фактора нужно рассматривать в непрерывной связи с  $KV_{ТО}$ .

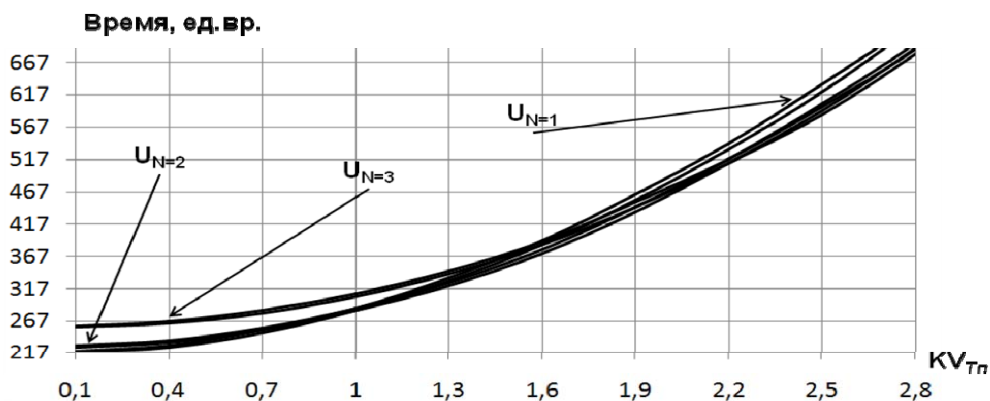


Рис. 3. Зависимость времени пребывания заявок в СЭП от  $KV_{ТП}$

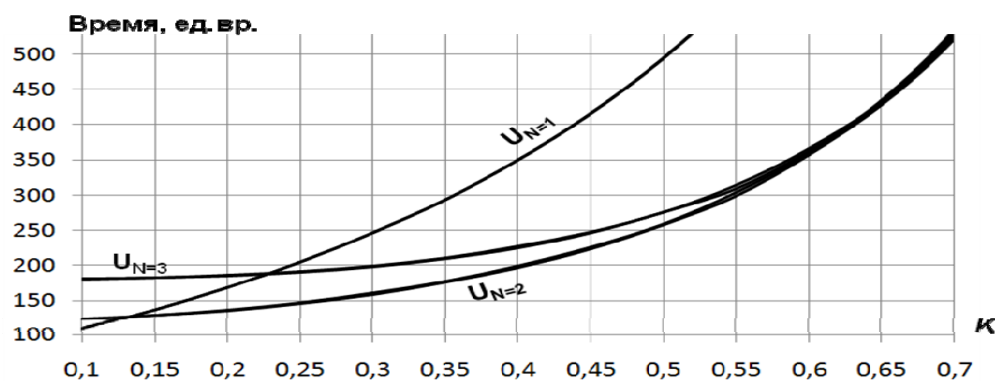


Рис. 3. Зависимость времени пребывания заявок в СЭП от  $Kз$

Аппроксимирующие функции для  $U_{N=i}$  с критерием достоверности аппроксимации  $R^2=0,999$  для всех трех случаев имеют вид  $U_{N=i} = C_6 + C_7/(1-Kз)$  с разницей лишь в константах  $C_6$  и  $C_7$ , которые не зависят от  $Kз$ .

### Пример

Приведем пример использования полученных результатов на практике. Пусть в некоторой фирме используется выделенный канал Интернет со скоростью 100 Мбит/с на витой паре. Предположим, что в связи с расширением фирмы становится необходимым удвоить указанную производительность канала. Возникает две альтернативы решения задачи:

- 1) проложить дополнительный канал со скоростью 100 Мбит/с на витой паре;
- 2) отказаться от использования существующего канала (сдать его в утиль), проложить новый, основанный на оптоволокне, и уже по нему оплатить подключение на скорости 200 Мбит/с.

Очевидно, что дешевле будет реализация первой альтернативы. Но, согласно бытовавшим представлениям, с точки зрения минимизации задержек выгоднее должен быть второй вариант. Однако рассмотрим конкретную ситуацию: замер параметров трафика в сети Fast Ethernet, состоящей из 500 компьютеров, в течение часа случайно взятого времени показал, что  $KV_{\text{ТП}} = 2,1$ ,  $KV_{\text{ТО}} = 1,31$ . Время прибытия в этом случае – это время между прибывающими пакетами. А время обработки определяется длиной пакета, так как скорость передачи постоянна. Если провести имитационное моделирование для загрузки 0,05–0,15 (при которой характеристики измеряются очень точно), а затем по полученным данным построить аппроксимирующие функции для числа  $N = 1$  и  $N = 2$ , то для  $U_{N=1}$  получим  $C_6 = -183$  и  $C_7 = 274$ , для  $U_{N=2}$  получим  $C_6 = -80$  и  $C_7 = 208$ . Если затем составить уравнение  $U_{N=1} = U_{N=2}$ , то его решением будет  $Kз = 0,34$ . Получаем, что при  $Kз > 0,34$  для минимизации задержек выгоднее использовать два канала, а не один. Иначе говоря, при определенной конфигурации передаваемого потока пакетов становится вполне реальной ситуация, когда даже с точки зрения минимизации задержек выгоднее использовать два низкоскоростных канала вместо одного высокоскоростного.

### Выводы

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Решение задачи выбора оптимального числа каналов (при сохранении их суммарной производительности) с точки зрения минимизации задержек в М/М/Н нельзя распространять на весь класс G/G/N.
2. Необходимость увеличения числа приборов в СЭП (для минимизации задержек) возрастает:
  - с увеличением загрузки;
  - с увеличением коэффициента вариации времени между приходами заявок;
  - с увеличением коэффициента вариации времени обслуживания заявок.На понятийном уровне такой эффект означает, что большее число каналов (по сравнению с меньшим числом) сглаживает пульсации входящего потока сообщений, давая им быстрее попасть на обслуживание.
3. Независимое влияние на выбор числа каналов оказывает только коэффициент вариации времени обслуживания заявок. Два других фактора увеличивают скорость его воздействия.
4. Полученные аппроксимирующие функции могут быть использованы при выборе оптимального числа каналов в СЭП G/G/N.

### Литература

1. Шнепс М. А. Системы распределения информации. Методы расчета. – М.: Связь, 1979. – 344 с.
2. Клейнрок Л. Коммуникационные сети (стохастические потоки и задержки сообщений). – М.: Наука, 1970. – 256 с.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

*Соснин Владимир Валерьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsosnin@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМАССОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОСТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн

Рассмотрены особенности использования многомассовых систем микромеханических гироскопов. Проанализированы линейные и угловые осцилляторы с механической и электрической связями между осцилляторами. Приведены требования к параметрам конструкции, обеспечивающие повышение стойкости к вибрационным перегрузкам.

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, связанные осцилляторы, упругий подвес.

### Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется расширению областей применения микромеханических гироскопов (ММГ), изготавливаемых на основе технологий микроэлектронной промышленности. Перспективно использование ММГ в системах автоматического управления движением высокодинамичных объектов, для которых характерны повышенные динамические перегрузки – высокочастотные вибрации в широких диапазонах (в том числе с частотами выше 2 кГц) и интенсивные удары (с уровнями выше 100g) [1].

Принцип работы большинства ММГ аналогичен принципу работы осцилляторных вибрационных гироскопов и основан на измерении перемещений под действием сил Кориолиса, возникающих при угловой скорости основания  $\Omega$  [2]. На рис. 1 изображен чувствительный элемент в виде осциллятора на упругом подвесе. Инерционное тело (диск) в упругом подвесе под действием электростатического привода в автоколебательном режиме совершает первичные угловые колебания в плоскости диска с постоянной частотой  $\omega_1$  и амплитудой  $A_1$ . При наличии угловой скорости основания под воздействием кориолисовых сил возникают вторичные угловые колебания инерционного тела на частоте первичных колебаний. Амплитуда вторичных колебаний пропорциональна угловой скорости основания и измеряется емкостными датчиками.

Для повышения коэффициента преобразования ММГ выгодно использовать резонансную настройку (сведение частот первичных  $\omega_1$  и вторичных  $\omega_2$  колебаний инерционного тела, диска), при этом используется высокая добротность по оси вторичных колебаний. Исходя из требования повышения коэффициента преобразования, желательно понижение собственной частоты [3]. В то же время минимальная чувствительность ММГ к вибрации основания имеет место при значениях собственных частот осциллятора выше верхней границы частотного спектра вибрации, что исключает возникновение резонансных явлений в конструкции прибора. Это приводит к противоречию между достижением максимальной чувствительности прибора и обеспечением нечувствительности к вибрации основания.

Один из путей снижения чувствительности ММГ к поступательной вибрации состоит в использовании только угловых колебаний (рис. 1). Для идеального прибора при отсутствии технологических погрешностей (статического и динамического дисбалансов) и при равножесткости упругого подвеса поступательная вибрация не оказывает влияния на показания прибора [4]. Тем не менее, ММГ с угловым осциллятором остается чувствительным к угловым вибрациям основания.

Следует отметить, что в технических требованиях, как правило, регламентируется воздействие линейной вибрации, при этом факт существования угловой вибрации игнорируется. Однако в действительности имеют место и линейные, и угловые колебания. По экспериментальным данным, спектральная плотность случайных вибраций для определенного класса объектов, на которых предполагается установка ММГ, имеет



следующий порядок величин: уровень случайной поступательной вибрации –  $0,1-10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ , а уровень случайной угловой вибрации, коррелированной с поступательной, – около  $10 \text{ с}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$  [5]. На частотах, соответствующих значениям собственных частот первичных и вторичных колебаний порядка 3 кГц, амплитуды угловых вибраций могут составлять 0,3 угловых секунд.

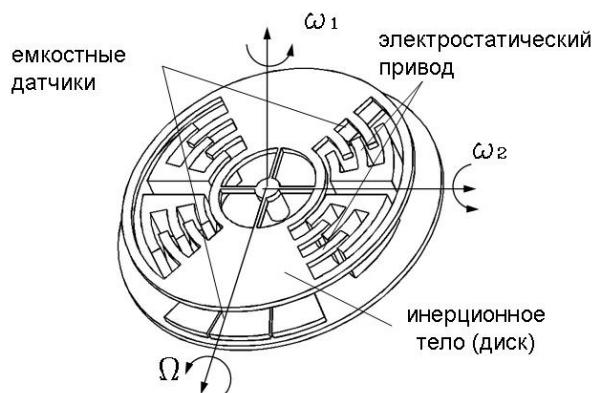


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента ММГ:  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – частоты первичных и вторичных колебаний;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость основания

### Механически связанные осцилляторы

Устранение указанного противоречия между повышением чувствительности к измеряемой угловой скорости и снижением чувствительности к инерционным воздействиям основания вследствие угловых колебаний последнего может быть достигнуто использованием многомассовых систем ММГ. Известные технические решения в основном относятся к линейным осцилляторам, которые содержат два противофазно колеблющихся инерционных тела в собственных упругих подвесах с идентичными частотными характеристиками. Связь между телами может осуществляться с использованием дополнительных упругих элементов, как в приборе компании Litef (Германия) [6], либо с использованием электрических контуров синхронизации, как в гироскопах ADXRS фирмы Analog Devices (США) [7].

Известна конструкция ММГ с двумя угловыми осцилляторами, связанными дополнительным упругим элементом [8]. Здесь два угловых осциллятора (рис. 2) совершают противофазные первичные угловые колебания. При движении основания с угловой скоростью, вектор которой направлен по оси чувствительности прибора, инерционные тела совершают противофазные вторичные колебания, а при угловых вибрациях основания вторичные колебания осцилляторов будут синфазными. Авторами показано, что дополнительный (соединительный) упругий элемент должен иметь минимальную жесткость в противофазном движении и значительную жесткость в синфазном движении. Это позволяет при определенном включении электродов емкостных датчиков измерения вторичных колебаний (рис. 2) получить нечувствительность ММГ к угловым ускорениям основания.

Преимущества такой конструкции заключаются в том, что механическое соединение осцилляторов с помощью соединительного упругого элемента позволяет создать связанную колебательную систему. Желательно, чтобы в рабочем автоколебательном режиме при противофазных первичных угловых колебаниях амплитуды обоих инерционных тел были равны, только при этом будет иметь место полная компенсация по отношению к угловым колебаниям основания. Однако неизбежное различие параметров упругих подвесов приводит к различиям амплитуд в связанной механической системе. Авторами получено, что при несовпадении парциальных собственных частот  $\omega_1^{(1)}$  и

$\omega_1^{(2)}$  двух инерционных тел относительная разность  $(\Delta A/A)$  амплитуд  $A_1^{(1)}$  и  $A_1^{(2)}$  свободных противофазных колебаний определяется формулой

$$\Delta A/A = k [(\omega_1^{(1)})^2 - (\omega_1^{(2)})^2] / \omega_c^2,$$

где  $k$  – безразмерный параметр порядка единицы, а  $\omega_c$  – собственная частота синфазных связанных колебаний (эти колебания не реализуются в рабочем режиме, а только могут быть рассчитаны).

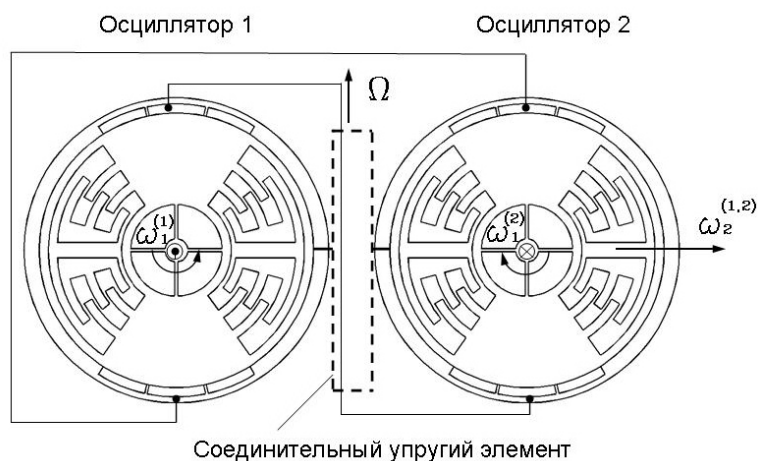


Рис. 2. Конструкция ММГ с двумя угловыми осцилляторами

Из этого следует, что при очевидности требования близости парциальных частот целесообразно выбирать такие формы соединительного упругого элемента, чтобы он имел возможно большую жесткость при синфазных колебаниях при ограниченной жесткости в противофазных. Таким образом, соединительный элемент, как указано выше, должен обладать определенными упругими характеристиками и, кроме того, обеспечивать требуемые упругие свойства в синфазных и противофазных первичных и вторичных колебаниях.

Представленный подход имеет существенные ограничения в настройке и обеспечении требуемых свойств чувствительного элемента ММГ. Для обеспечения равенства амплитуд противофазных первичных колебаний при наличии неравенства парциальных частот первичных колебаний отдельных осцилляторов необходимы другие, специальные средства.

### Механически не связанные осцилляторы

Одним из вариантов, расширяющих возможности настройки, является построение ММГ на основе механически не связанных угловых осцилляторов. При этом связь между осцилляторами осуществляется только электрически. Для реализации такой схемы необходимо обеспечить точную настройку первичных частот осцилляторов и оценить, в каком диапазоне может существовать разброс частот первичных колебаний осцилляторов.

Оценка значимости технологических погрешностей изготовления различных упругих подвесов показывает, что основное влияние на частоты первичных колебаний оказывает ширина упругих элементов, и это влияние на собственную частоту оценивается величиной порядка 300–500 Гц/мкм [9]. При достижимой точности изготовления на уровне 0,2 мкм разброс частот составит порядка 60–100 Гц. Для компенсации технологических погрешностей изготовления, приводящих к разбросу собственных частот,

могут быть использованы различные устройства, создающие электрическую жесткость по оси первичных колебаний, в том числе:

- электростатические двигатели первичных колебаний, у которых зубцы выполнены с определенным наклоном по отношению друг к другу. Это позволяет создавать дополнительные силы для регулирования частоты первичных колебаний;
- несоосные электроды, центр которых не совпадает с центром вращения инерционного тела в упругом подвесе;
- дополнительные плоские электроды, расположенные, например, вдоль упругих элементов подвеса для создания дополнительной электрической жесткости вокруг оси первичных колебаний (рис. 3). Такая система аналогична системе электрической жесткости для регулировки частоты вторичных колебаний [3].

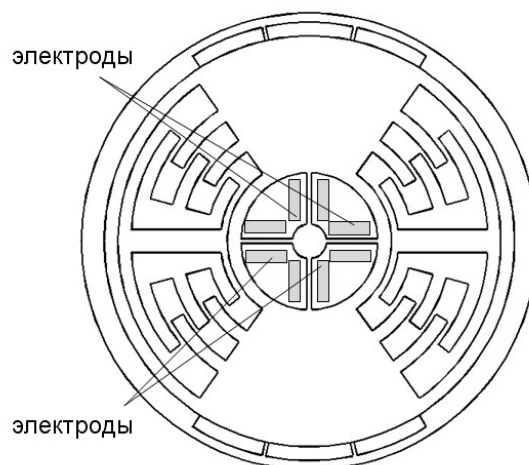


Рис. 3. Электроды для создания электрической жесткости по оси первичных колебаний

Оценим эффективность последнего решения. Создаваемая дополнительная электрическая жесткость описывается выражением [3]

$$C_{\text{эл}} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 r^2 S U^2}{d_0^3} = K U^2,$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $r$  – расстояние от центра инерционного тела до центра электрода;  $S$  – площадь электрода;  $U$  – электрическое напряжение;  $d_0$  – зазор в датчике.

Требуемое напряжение для создания изменения частоты на  $\Delta\omega_{\text{эл}}$  составит

$$U = 2\pi \sqrt{\frac{2J\Delta\omega_{\text{эл}}\omega_1}{K}},$$

где  $J$  – момент инерции диска по оси первичных колебаний. На основании последней формулы для 8 электродов при параметрах гироскопа  $\varepsilon = 1$  (вакуум);  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $r = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $S = 1,8 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>;  $d_0 = 3 \cdot 10^{-6}$  м;  $J = 7,8 \cdot 10^{-13}$  кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1 = 3000$  Гц для компенсации  $\Delta\omega_{\text{эл}} = 60$  Гц в системе подстройки частоты требуется создать электрическое напряжение  $U = 21$  В. Требование к относительной величине совпадения частот вторичных колебаний  $\delta_{\omega_2}$  для обеспечения нечувствительности к угловой вибрации основания может быть оценено с использованием следующего выражения:

$$\delta_{\omega_2} = \delta\Omega / \omega_2 \alpha_{\text{в}},$$

где  $\delta\Omega$  – погрешность измерения угловой скорости основания,  $\alpha_{\text{в}}$  – амплитуда угловой вибрации. При  $\delta\Omega = 1,75 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> (0,01 град/с),  $\omega_2 = 18850$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha_{\text{в}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  рад (0,3 угловых секунды) имеем  $\delta_{\omega_2} = 0,6\%$ , т.е. в абсолютных единицах разность частот не должна превосходить 18 Гц. Как показано в работе [9], совпадение частот с требуемой точно-

стью может быть обеспечено системой электрической жесткости с использованием электродов, расположенных под диском.

### Заключение

Использование многомассовых систем позволяет повысить вибростойкость ММГ для применения их в качестве датчиков угловой скорости высокочастотных объектов. Подобные ММГ допускается использовать в частотном диапазоне вибраций, включающем частоты собственных колебаний осцилляторов. Такое решение требует точной настройки собственных частот осцилляторов. Для этого могут быть использованы системы электрической жесткости, позволяющие компенсировать технологические разбросы частот вследствие погрешностей изготовления элементов конструкции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 07-08-00699.

### Литература

1. Пешехонов В.Г. и др. Микромеханический гироскоп для высокочастотных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2007. Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 442–444.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
3. Кучерков С.Г., Шадрин Ю.В. К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С. 94–101.
4. Евстифеев М.И. Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 2. – С. 19–25.
5. Geen J. Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine. – November, 2004. – P. 12–17.
6. Geiger W. et al. Test Results of the Micromechanical Coriolis Rate Sensor  $\mu$ CORS II // Symposium Gyro Technology. – 2004, Stuttgart, Germany.
7. Geen J., Krakauer D. New iMEMS<sup>®</sup> Angular-Rate-Sensing Gyroscope // Analog Dialogue. – March 2003. – Volume 37. – № 3. – P.12–14.
8. U.S. Patent 5635640. Micromachined Device with Rotationally Vibrated Masses / Geen J.; Analog Devices, Inc. – Jun. 3, 1997. – 16 p.
9. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2003. – № 2. – С. 24–31.

- Евстифеев Михаил Илларионович* – ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», начальник отдела, доктор технических наук, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru
- Розенцвейн Дмитрий Владимирович* – ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», инженер, аспирант, rosenzwein@mail.ru

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.А. Гатчин, О.А. Кузнецова, В.В. Лобов

В статье рассмотрен практический опыт расчета надежности (безотказности) при проектировании структурно избыточных (резервированных) изделий, входящих в сложные технические системы и построенных на устройствах с неполным контролем отказов и с ограничениями безотказности как средств контроля, так и элементов переключения с основного на резервное устройство.

**Ключевые слова:** надежность, безотказность.

### Введение

Повышение безотказности изделий при проектировании путем введения структурного резервирования имеет широкое распространение. Схемы расчета безотказности таких изделий обычно представляются в виде параллельного соединения входящих устройств без учета влияния контроля и надежности элементов переключения на резерв. При этом идеализируется как полнота контроля ( $\omega=1$ ), так и безотказность средств контроля и элементов переключения. Для примера на рис. 1 представлена схема возможных состояний изделия как идеализированной резервированной группы. Отказ такой резервированной группы возникает при отказе и первого, и второго устройства. Схема расчета надежности изделия представлена на рис. 2.

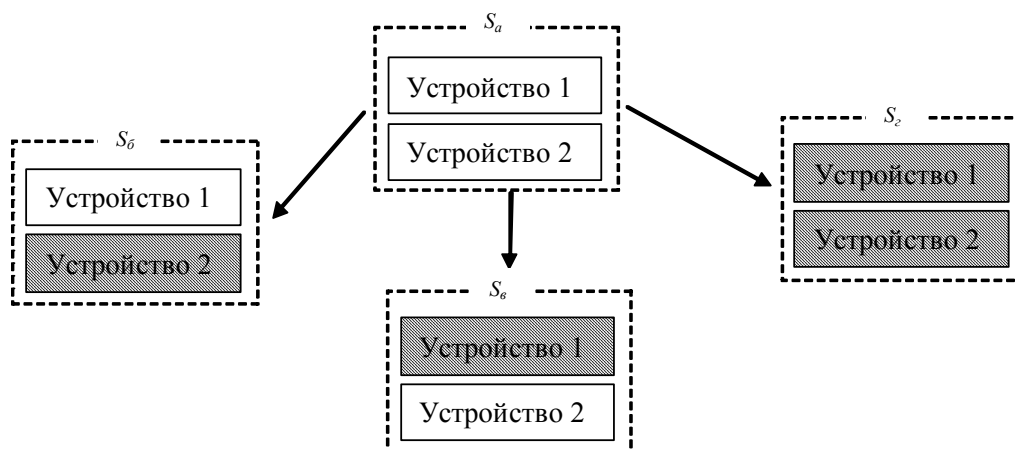


Рис. 1. Схема возможных состояний изделия как идеализированной резервированной группы устройств:  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  – безотказные состояния

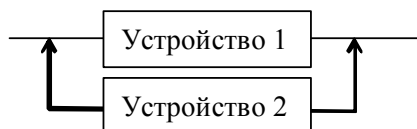


Рис. 2. Схема расчета безотказности резервированной группы, состоящей из основного и резервного устройств

Алгебраическое уравнение работоспособности  $R$ , соответствующая ей функция вероятности безотказной работы  $P(t)$  и вероятности отказа  $Q(t)$  [1–3] для резервированной (дублированной) группы при идеальном контроле и идеальном переключении на применение резерва имеют следующий вид:

$$R = S_a + S_b + S_c, \quad (1)$$

$$P(t) = P_1(t) + Q_1(t) \cdot P_2(t), \quad (2)$$

$$Q(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t). \quad (3)$$

### Цель исследования

На практике при проектировании не удастся реализовать полный контроль отказов (работоспособности) устройств, а элементы, реализующие переключение на резервное устройство, ограничены по надежности, поэтому применение идеализированных моделей расчета безотказности может привести к получению завышенных значений показателей безотказности. Цель исследования – проанализировать возможные модели расчета резервированных групп устройств при проектировании с учетом реального контроля и безотказности элементов переключения на резерв.

### Учет контроля и переключения

Контроль работоспособности устройств, как правило, основывается на результатах следующих видов контролей:

- контроль отдельного устройства собственными встроенными программно-аппаратными средствами, полнота контроля при этом ограничивается возможностями внутренних программных и аппаратных средств;
- функциональный контроль – контроль на уровне изделия в целом за счет выполнения специальных режимов контроля или при непосредственном рабочем функционировании;
- органолептический контроль со стороны экипажа или обслуживающего персонала.

Для нерезервированных изделий показатели контроля в процессе работы могут влиять на обеспечение отказобезопасности, а при выполнении технического обслуживания – на своевременность выполнения, в случае необходимости, восстановительных работ. Для изделий с резервированием входящих устройств полнота контроля, кроме того, непосредственно влияет на реализацию реконфигурации структуры изделия при отказах и, как следствие, на безотказность изделия.

Характеристики системы контроля обеспечивают эффективность резервирования. Необнаруженный отказ, например, не позволяет отключить отказавшее основное устройство и заменить его на работоспособное резервное, и это означает, что изделие при работоспособном резервирующем устройстве оказывается в состоянии отказа. С другой стороны, принятие мер по повышению полноты контроля может привести к увеличению объема аппаратуры, что, в свою очередь, снижает безотказность. Оптимальное соотношение между показателями контролепригодности и выделяемыми ресурсами необходимо получать с помощью соответствующих методов оптимизации.

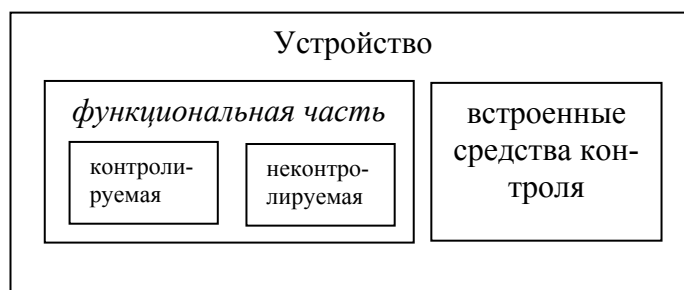


Рис. 3. Представление контролируемого устройства со встроенными средствами контроля

Общий случай контролируемого устройства со встроенными средствами контроля представлен на рис. 3. При безотказном состоянии средств контроля имеется методическое ограничение достоверности результатов контроля ( $\omega < 1$ ), что ведет к разделению

устройства на контролируруемую (к) и неконтролируемую (нк) части. В результате отказа элементов средства контроля исправное (безотказное) устройство может ложно индцироваться как отказавшее (ложный отказ – ошибка контроля 1-го рода), а неисправное может ложно индцироваться как исправное (ложная исправность – ошибка 2-го рода). В части надежности элементов переключения возможно ложное переключение на резерв при исправном основном устройстве или ложное непереключение на резерв при отказавшем основном устройстве.

### Построение модели расчета безотказности

Образуемые при отказах сочетания состояний основного и резервного устройств, средства контроля СК и элементов ПУ формируют множество вариантов отказных состояний изделия в целом. На рис. 4 представлены наиболее вероятные отказные состояния изделия, включая виды отказа системы контроля (СК) и переключающих устройств (ПУ), при этом рассмотрен случай алгоритма функционирования с приоритетным использованием устройства 1.

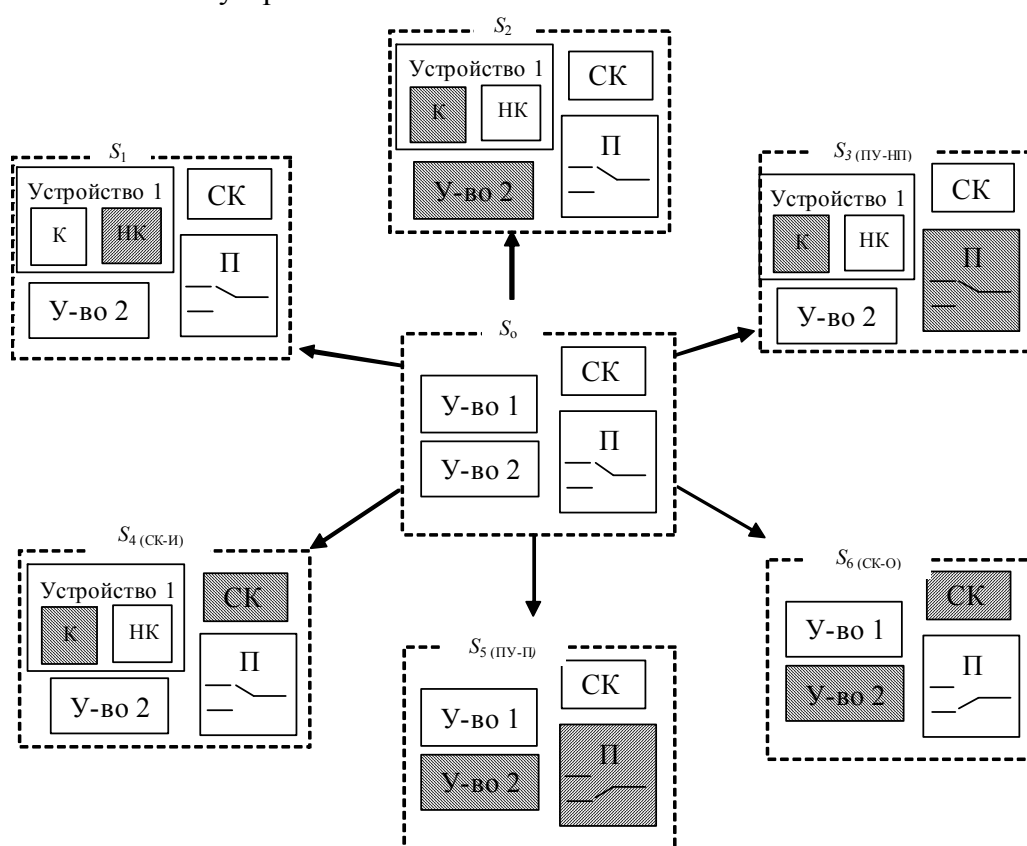


Рис. 4. Схема наиболее вероятных отказных состояний резервированной группы:  $S_0$  – исправное состояние изделия;  $S_1$  – отказ неконтролируемой части основного устройства;  $S_2$  – отказ основного устройства в контролируемой части и отказ резервного устройства;  $S_3$  – отказ основного устройства в контролируемой части и отказ устройств переключения вида «Не переход» (ПУ-НП);  $S_4$  – отказ основного устройства в контролируемой части и отказ системы контроля вида «Исправность» (СК-И) – ложная исправность;  $S_5$  – отказ элементов переключения вида «Переход» (ПУ-П) при исправном основном устройстве и отказ резервного устройства;  $S_6$  – отказ системы контроля вида «Отказ» (СК-О) при исправном основном устройстве и отказ резервного устройства

Вероятность безотказной работы такой группы за время  $t$  определяется вероятностью сохранения работоспособного состояния неконтролируемой части основного устройства, а в случае контролируемого отказа основного устройства – успешным переходом на работоспособное резервирующее устройство. Алгебраическое уравнение отказа и функция вероятности отказа резервированной группы с неполным контролем и вероятным переходом на применение резервного устройства, в соответствии с рис. 4, имеют следующий вид:

$$O = \sum_{i=1}^6 S_i, \quad P(O) = Q(t) = \sum_{i=1}^6 P(S_i);$$

$$P(S_1) = P_{1,К}(t) \cdot Q_{1,НК}(t) \cdot [1 - Q_{СК-О}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-П}(t)];$$

$$P(S_2) = Q_{1,К}(t) \cdot P_{1,НК}(t) \cdot [1 - Q_{СК-И}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-НП}(t)] \cdot Q_2(t);$$

$$P(S_3) = Q_{1,К}(t) \cdot P_{1,НК}(t) \cdot [1 - Q_{СК-И}(t)] \cdot Q_{ПУ-НП}(t) \cdot P_2(t);$$

$$P(S_4) = Q_{1,К}(t) \cdot P_{1,НК}(t) \cdot Q_{СК-И}(t) \cdot [1 - Q_{ПУ-НП}(t)] \cdot P_2(t);$$

$$P(S_5) = P_1(t) \cdot [1 - Q_{СК-О}(t)] \cdot Q_{ПУ-П}(t) \cdot Q_2(t);$$

$$P(S_6) = P_1(t) \cdot Q_{СК-О}(t) \cdot [1 - Q_{ПУ-П}(t)] \cdot Q_2(t);$$

$$Q(t) = P_{1,К}(t) \cdot \{Q_{1,НК}(t) \cdot [1 - Q_{СК-О}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-П}(t)]\} + P_1(t) \cdot (1 - [1 - Q_{СК-О}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-П}(t)]) \cdot Q_2(t) + Q_{1,К}(t) \cdot P_{1,НК}(t) \cdot [1 - Q_{СК-И}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-НП}(t)] \cdot Q_2(t) + Q_{1,К}(t) \cdot P_{1,НК}(t) \cdot (1 - [1 - Q_{СК-И}(t)] \cdot [1 - Q_{ПУ-НП}(t)]) \cdot P_2(t). \quad (4)$$

Здесь  $P_{1,К}(t)$ ,  $P_{1,НК}(t)$  – вероятность безотказной работы за время  $t$  контролируемой и неконтролируемой части основного устройства соответственно;  $Q_{1,К}(t)$ ,  $Q_{1,НК}(t)$  – вероятность отказа за время  $t$  контролируемой и неконтролируемой части основного устройства соответственно;  $Q_2(t)$ ,  $P_2(t)$  – вероятность отказа и вероятность безотказной работы за время  $t$  резервного устройства соответственно;  $Q_{ПУ-НП}(t)$  – вероятность отказа переключающих элементов вида «Не переход»;  $Q_{ПУ-П}(t)$  – вероятность ложного перехода на резервное устройство в результате отказа переключающих элементов;  $Q_{СК-О}(t)$  – вероятность отказа СК вида «Отказ»;  $Q_{СК-И}(t)$  – вероятность отказа СК вида «Исправность».

### Сравнительный анализ моделей расчета безотказности

Для сравнения произведены расчеты проектируемого изделия, состоящего из двух вычислительных машин (основной и резервной) и коммутирующего устройства, выполняющего функцию переключения между основной и резервной машинами, для следующих случаев:

- при полном контроле и идеальной надежности СК и переключающих устройств;
- при неполном контроле и идеальной надежности СК и переключающих устройств;
- при неполном контроле и неидеальной надежности СК и переключающих устройств;

Средняя наработка на отказ вычислительной машины принята равной  $T_{ВМ} = 5000$  ч. Контроль работоспособности цифровых машин осуществляется аппаратно-программными средствами с полнотой  $\omega = 0,85$ .

К средствам системы контроля относятся элементы, реализующие контроль вторичных напряжений питания и токов потребления, автоматически выполняемый встроенными аппаратными средствами модуля напряжений, а также элементы контрольных каналов. В результате проведенного анализа отказов СК и устройства переключения выявлено, что интенсивность отказов элементов, участвующих только в функции контроля и переключения, составляет не более 1% от интенсивности отказов оборудования, исходя из этого, в оценке принято приближенное значение интенсивностей видов отказов  $\lambda_{Л-П} = \lambda_{Л-НП} = \lambda_{Л-О} = \lambda_{Л-Г} = 2 \cdot 10^{-6}$  1/ч. Интервал рассматриваемого времени принят равным 20 ч.

Варианты формулы расчета вероятности отказа изделия и расчетные значения представлены в табл. 1. Для варианта б (при неполном контроле безотказности основ-



ного устройства, идеальной надежности СК и переключающих устройств) формула (2) трансформируется и приобретает вид  $Q_6(t) = Q_{\text{ВМ1,НК}}(t) \cdot P_{\text{ВМ1,К}}(t) + Q_{\text{ВМ1,К}}(t) \cdot Q_{\text{ВМ2}}(t)$ .

В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод, что идеализация показателей контролепригодности при оценке безотказности изделий на этапах проектирования ведет к получению завышенных результатов (в данном примере в 60 раз по показателю вероятности отказа). Разница (цена упрощения расчетной формулы вероятности отказа) результатов вычислений резервированной группы по формулам  $Q_6(t)$  и  $Q_В(t)$  для рассматриваемого случая составляет менее 1%.

На рис. 5 представлен график зависимости разницы вычислений по формулам  $Q_6(t)$  и  $Q_В(t)$  от рассматриваемого интервала времени, в соответствии с которым результаты вычислений по упрощенной формуле можно применять для интервалов до 500 ч.

Вариант	Формула вероятности отказа	Значение вероятности отказа
а	$Q_a(t) = Q_{\text{ВМ1}}(t) \cdot Q_{\text{ВМ2}}(t)$	0,0000159
б	$Q_6(t) = Q_{\text{ВМ1,НК}}(t) \cdot P_{\text{ВМ1,К}}(t) + Q_{\text{ВМ1,К}}(t) \cdot Q_{\text{ВМ2}}(t)$	0,0006113
в	$Q_В(t) = P_{\text{ВМ1,К}}(t) \cdot \{Q_{\text{ВМ1,НК}}(t) \cdot [1 - Q_{\text{СК-О}}(t)] \cdot [1 - Q_{\text{ПУ-П}}(t)] + P_1(t) \cdot (1 - [1 - Q_{\text{СК-О}}(t)] \cdot [1 - Q_{\text{ПУ-П}}(t)] \cdot Q_{\text{ВМ2}}(t))\} + Q_{\text{ВМ1,К}}(t) \cdot P_{\text{ВМ1,НК}}(t) \cdot \{[1 - Q_{\text{СК-И}}(t)] \cdot [1 - Q_{\text{ПУ-НП}}(t)] \cdot Q_{\text{ВМ2}}(t) + (1 - [1 - Q_{\text{СК-И}}(t)] \cdot [1 - Q_{\text{ПУ-НП}}(t)]) \cdot P_{\text{ВМ2}}(t)\}$	0,0006119

Таблица 1. Результаты сравнения вариантов расчета резервированной группы

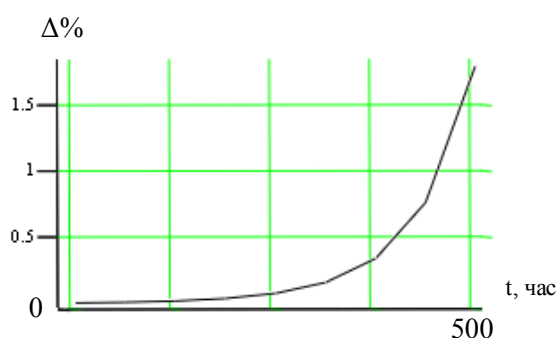


Рис. 5. Зависимость разницы результатов вычислений надежности резервированной группы по формулам  $Q_6(t)$  и  $Q_В(t)$

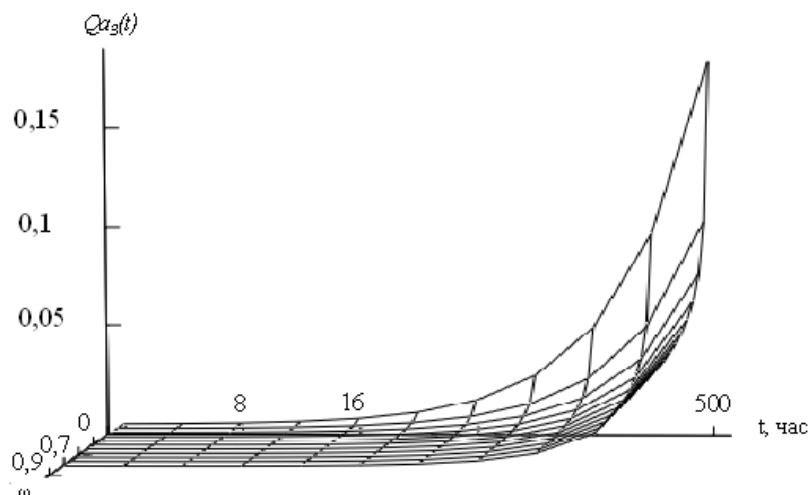


Рис. 6. Изменение вероятности отказа изделия, состоящего из двух резервированных устройств  $Q_{a3}(t, \omega)$ , в зависимости от интервала времени и полноты контроля отказов

На рис. 6 представлена результирующая функциональная зависимость вероятности отказа резервированной группы от значений полноты контроля основного устройства и интервала рассматриваемого времени. В соответствии с рис. 6 значение вероятности отказа во времени тем ниже, чем выше значение полноты контроля.

На рис. 7 и 8 графически представлены доли влияния значений первого и третьего слагаемого формулы (2) в вероятности отказа изделия в целом. Согласно графикам, на интервалах времени до 150 ч. основное влияние оказывает первое слагаемое  $(P_{ВМ1,К}(t) Q_{ВМ1,НК}(t) [1 - Q_{СК-О}(t)] [1 - Q_{ПУ-П}(t)])$ , в котором при малых временах (когда вероятность безотказной работы контролируемой части остается близкой к 1) наиболее важно значение ненадежности неконтролируемой части основного устройства, так как в этом случае переход на резервное устройство не будет осуществлен из-за незнания о самом факте отказа.

Доля влияния оставшихся двух слагаемых на интервале времени до 1000 ч составляет менее 1%.

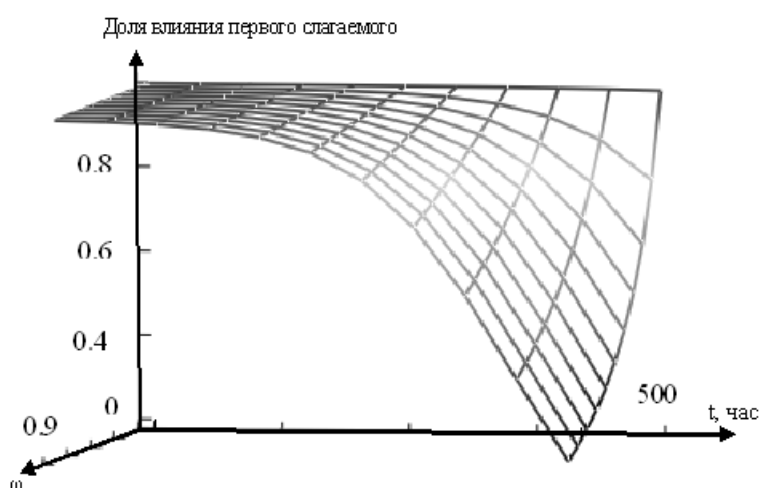


Рис. 7. Изменение доли влияния значения первого слагаемого  $(P_{ВМ1,К}(t) Q_{ВМ1,НК}(t) [1 - Q_{СК-О}(t)] [1 - Q_{ПУ-П}(t)])$  на вероятность отказа изделия в целом

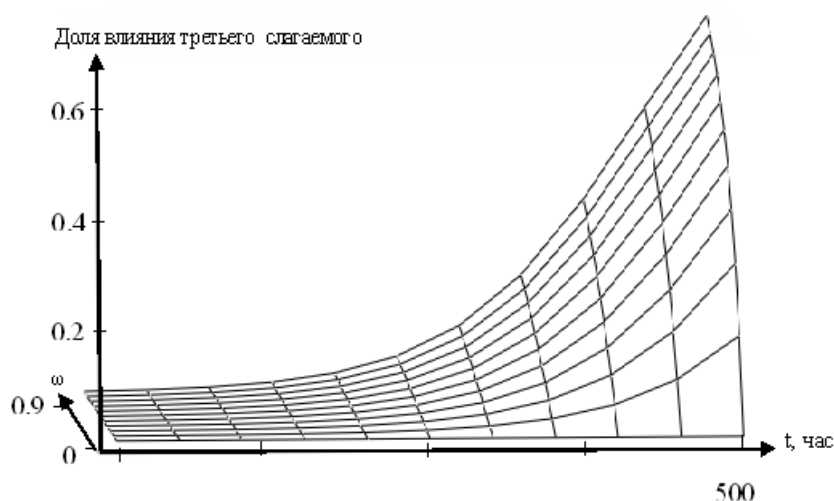


Рис. 8. Изменение доли влияния значения третьего слагаемого

$(Q_{\text{ВМ1,К}}(t) P_{\text{ВМ1,НК}}(t) [1 - Q_{\text{Л-Г}}(t)] [1 - Q_{\text{Л-НП}}(t)] Q_{\text{ВМ2}}(t))$  на вероятность отказа изделия в целом

### Заключение

Результаты проведенного анализа вариантов расчета безотказности резервированных изделий при проектировании сложных технических систем с учетом параметров контроля и надежности элементов переключения позволяют сделать вывод, что:

- выполнение оценки безотказности резервированных изделий без учета полноты контроля выдает завышенные результаты;
- на начальных интервалах рассматриваемого времени основное влияние на безотказность изделия оказывает вероятность отказа неконтролируемой части основного изделия;
- оценку безотказности изделия, состоящего из основного и резервного устройства, на интервалах времени, при которых справедливо соотношение  $\lambda t < 0,05$ , можно осуществлять по сокращенной формуле расчета вероятности отказов без учета надежности средств контроля и переключающих элементов, вероятность отказов которых составляет менее 5% вероятности отказов устройств.

### Литература

1. Половко А.М. Основы теории надежности. – М.: Наука, 1964.
2. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1975.
3. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985.

*Гатчин Юрий Арменакович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, gatchin@mail.ifmo.ru

*Лобов Вадим Владимирович*

– ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика», начальник отдела надежности, lobov@online.ru

*Кузнецова Ольга Александровна*

– ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика», ведущий инженер отдела надежности, kuzola@ya.ru

УДК 532.74

**МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА НАНОФАЗЫ****А.И. Свитенков, В.В. Лесничий, С.А. Чивилихин, В.В. Гусаров**

Описываются результаты моделирования структуры жидкости методами молекулярной динамики в нанообластях. В результате моделирования были обнаружены упорядоченные, кристаллоподобные фрагменты в нанофазе, называемые кристаллитами. Рассматриваются особенности их формирования в различных условиях.

**Ключевые слова:** микро-наногидродинамика, нанофаза, нанотрубка, микротрубка, кристаллит, молекулярная динамика, жидкость.

**Введение**

Наногидродинамика – одно из новых направлений гидромеханики, связанное с нанотехнологиями. В традиционной гидродинамике изучается движение газов и жидкостей в макроскопических размерах. Возникает вопрос о гидродинамике в области размеров, условно относящихся к области нанотехнологий (менее 100 нм).

Основные уравнения наногидродинамики еще не записаны, а постановка эксперимента оказывается чрезвычайно сложной в силу малости исследуемых объектов. Поэтому наиболее распространенным инструментом исследования в этой области на текущий момент является метод моделирования молекулярной динамики, служащий основой существующих расчетных работ. Особенность нанотечений, позволяющую говорить о необходимости построения новой аналитической модели и не раз отмеченную в работах по моделированию молекулярной динамики, в самом общем случае можно характеризовать как проявление молекулярной структуры сплошной среды [1]. С аналогичными явлениями физика сталкивалась прежде при изучении броуновского движения и движения летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы, однако накопленный опыт, скорее, будет полезным при рассмотрении течения разреженных сред (газа) [2]. Наиболее простой способ учета специфики такого рода течений сводится к решению обычных уравнений гидродинамики, но с учетом частичного проскальзывания на границе твердого тела [3, 4].

При рассмотрении течения жидкости, как следует из всего сказанного, первоочередную важность приобретает вопрос о молекулярной структуре жидкости как в нормальных условиях, так и в условиях ограниченности нанообласти [5]. Вопрос структуры жидкости обсуждается еще с 1930-х г.г. При поверхностном рассмотрении в данной дискуссии можно выделить две соперничающих точки зрения, автором одной из которых является Я.И. Френкель. В рамках его взгляда жидкость рассматривается как набор упорядоченных, кристаллоподобных фрагментов (кристаллитов), разделенных аморфной фазой. Противоположная точка зрения допускает наличие только ближнего порядка в жидкости. Стоит отметить, что данный вопрос вплоть до относительно недавнего времени – начала развития нанотехнологий – носил лишь фундаментальный характер и допускал наличие двух точек зрения, каждая из которых вполне объясняла макроскопические свойства жидкости. Однако в условиях развития наногидродинамики разрешение спора имеет принципиальное значение и является отправной точкой для дальнейшего продвижения науки.

Настоящая работа посвящена описанию результатов моделирования структуры жидкости в нанообластях при помощи методов молекулярной динамики, в ходе которого было получено кристаллитное строение жидкости. Описываются основные законо-

мерности формирования и разрушения кристаллитов при различных условиях моделирования.

### Моделирование молекулярной динамики

Исследование строилось на методе моделирования молекулярной динамики, при помощи которого определялась структура жидкости в наноразмерных условиях.

В соответствии с определением в методе молекулярной динамики последовательность конфигураций обусловлена микроскопической причинно-временной зависимостью, устанавливаемой классическими уравнениями движения, т.е. моделирование движения частиц осуществляется путем расчета взаимодействия каждой молекулы (атома) с окружающими ее в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{F}_{ij},$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -й частицы,  $\mathbf{r}_i$  – координата  $i$ -й частицы,  $\mathbf{F}_{ij}$  – сила взаимодействия  $i$ -й и  $j$ -й частицы. Сила взаимодействия находится в соответствии с выражением  $\mathbf{F}_{ij} = -\nabla U_{ij}$ .

Для описания межмолекулярного взаимодействия использовался потенциал Леннарда–Джонса [3]:

$$U(r) = \varepsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – глубина потенциальной ямы,  $\sigma$  – равновесное расстояние,  $\tau$  – расстояние между взаимодействующими молекулами.

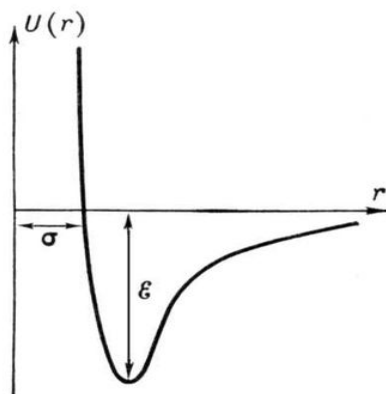


Рис. 1. Потенциал Леннарда–Джонса

Тогда сила взаимодействия между двумя wybranными молекулами найдется из формулы

$$F(r) = 12 \frac{\varepsilon}{\sigma} \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{13} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^7 \right].$$

Отличительной особенностью потенциала парного взаимодействия Леннарда–Джонса является чрезвычайно малая длина связи, что само по себе может оказаться причиной невозможности формирования аморфной фазы. С целью исключения подобного эффекта при моделировании также использовался эмпирический потенциал парного взаимодействия Пака–Доямы, при помощи которого принято описывать взаимодействие атомов металла. Он имеет вид

$$U(r) = -0,188917(r - 1,82709)^4 + 1,70192(r - 2,50849)^2 - 0,192294, \quad (2)$$

где  $r$  выражено в Å, а сама энергия – в эВ. Радиус обрезания равен  $r_c=3.44\text{Å}$ . Потенциал (2) включает в себя только ветвь притяжения, ветвь отталкивания заимствована из (1).

Для увеличения общей производительности программы при использовании потенциала (1) рассчитывалось взаимодействие только близлежащих молекул, т.е. допускалось увеличение расстояния взаимодействия по сравнению с равновесным в два раза. Также во внимание принималась кососимметричность матрицы  $F_{ij}$ , благодаря чему взаимодействие рассчитывалось только для половины частиц.

### Моделирование жидкости в плоском слое

При помощи описанных методов моделировалось поведение жидкости в плоском слое без наличия внешних воздействий. С целью обеспечения производительности для обнаружения качественных эффектов использовалась двумерная модель. Но, как оказывается, количество измерений в пространстве играет немаловажную роль, и пренебрежение третьим измерением может существенно улучшить структурообразующие свойства среды [6]. Поэтому была построена трехмерная модель, которая, наряду с двумерной, использовалась для уточнения и проверки выявленных закономерностей.

В первой модели роль стенок слоя выполняли два ряда (в двумерной модели) зафиксированных молекул с равновесным радиусом, большим радиуса молекул жидкости. Толщина слоя варьировалась от 1 до 5 нм при радиусе молекулы вещества 0,135 нм. В начале процесса молекулы в хаотичном порядке помещались в слой. В течение первых 200 итераций (за одну итерацию считается однократное взаимодействие каждой частицы с каждой) запрещалось возрастание энергии частиц выше уровня, соответствующего переходу вещества в газообразное состояние. Результаты моделирования схематично представлены на рис. 2.

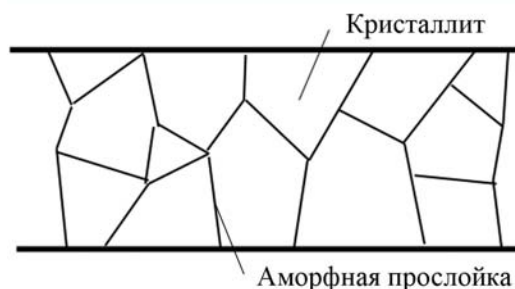


Рис. 2. Структура жидкости, полученная в результате моделирования

Иначе говоря, в плоском слое жидкость приобретает выраженную кристаллитную структуру. Средний поперечный размер кристаллита составляет  $\sim 1$  нм. Аморфная прослойка имеет толщину порядка двух калибров частиц жидкости. Стоит отметить, что при дальнейшем наблюдении системы соседние кристаллиты срастаются, образуя единую структуру, и, таким образом, если наблюдать систему достаточно долго, то все пространство между слоями окажется заполнено либо одним кристаллом, либо аморфной фазой, что зависит от начального уровня энергии.

Аналогичная модель была построена для трехмерного случая. Так как визуальное выделение кристаллитов в трехмерном случае не представляется возможным, то степень упорядоченности полученной структуры оценивалась посредством построения функции радиального распределения. На рис. 3, с, представлена расчетная функция радиального распределения, а на рис. 3, а, б – та же функция, полученная экспериментально [7] для твердого (слева) и жидкого (справа) алюминия для 650 и 670°C, т.е. в не-

посредственной близости к точке плавления/кристаллизации. На них хорошо виден качественный переход от дальнего порядка к ближнему.

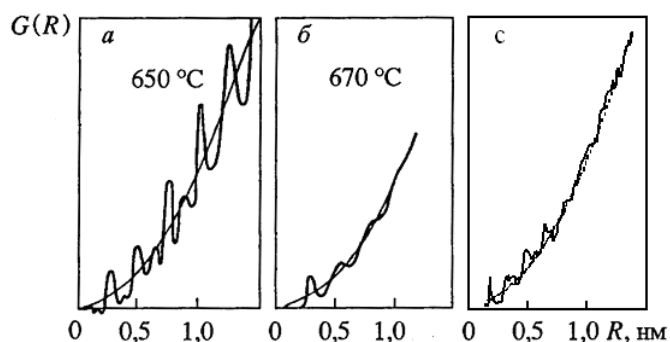


Рис. 3. Экспериментально полученная функция радиального распределения алюминия (а), (б) и расчетная функция радиального распределения (с)

На графике (а) (дальний порядок) заметны периодические пики плотности, которые соответствуют 1, 2 и т.д. координационным сферам. На графике (б) хорошо заметен только первый пик, в то время как дальнейшие смазаны. Наличие первого пика и подразумевает под собой ближний порядок, т.е. сохранение упорядоченности в первой координационной сфере. На графике (с), полученном в результате расчетов методами молекулярной динамики, хорошо заметны первые 4 пика, т.е. порядок сохраняется в четырех координационных сферах. Это соответствует кристаллиту с характерным размером 1,5 нм (диаметр молекулы 2 Å). Далее высота пиков резко уменьшается, однако ломаный характер кривой остается неизменным и отражает наличие кристаллитов во всем рассматриваемом образце.

Дабы исключить структурирующее влияние стенок, в обеих моделях стенки были заменены периодическими граничными условиями, однако это никак не сказалось на формировании кристаллитной структуры в ходе моделирования. Немаловажно, что схожие данные по наличию зернограничной структуры и среднему размеру кристаллита были получены в ряде экспериментальных работ по исследованию структуры расплавов металлов методами рентгенографического анализа [5].

### Выводы

В работе рассмотрен вопрос о структуре жидкости в наноразмерных областях. В результате моделирования структуры жидкости методами молекулярной динамики было обнаружено кристаллитное строение. С целью исключить такие возможные причины возникновения упорядоченной конфигурации, как малая длина межмолекулярной связи и структурирующее влияние стенок, при моделировании использовались два различных потенциала парного взаимодействия, а также два типа граничных условий. При рассмотрении трехмерной модели была построена функция радиального распределения нанофазы, которая показала существование «среднего» порядка. Данные о среднем размере кристаллита, полученные в результате симуляции хорошо согласуются с результатами экспериментальных работ по данной теме, в соответствии с которыми поперечный размер кристаллита составляет ~ 1.5 нм при размере частицы 2Å.

### Литература

1. Somers S. A., Davis H. T. Microscopic dynamics of fluids confined between smooth and atomically structured solid surfaces // J. Chem. Phys. – 1992. – № 96 (7). – P. 5389–5407.
2. Коган М.Н. Динамика разреженного газа (кинетическая теория). – М.: Наука, 1967. – 440 с.

3. Eijkel J. Liquid slip in micro- and nanofluidics: recent research and its possible implications // *Lab Chip*. – 2007. – № 7. – P. 299–301.
4. Eric L. Brenner P. and Stone A. Microfluidics: The No-Slip Boundary Condition // *Handbook of Experimental Fluid Dynamics*. – 2005. – №15. – P. 5–15.
5. Kotsalis E.M., Walther J.H., Koumoutsakos P. Multiphase water flow inside carbon nanotubes // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2004. – №30. – P. 995–1010.
6. Полухин В. А. Моделирование наноструктуры и прекурсорных состояний. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 206 с.
7. Пастухов Э.А., Ватолин Н.А., Лисин В.Л., Денисов В.М., Качин С.В. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 352 с.

- Свитенков Андрей Игоревич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, svitenkov@yandex.ru
- Лесничий Василий Валерьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, KPNK@yandex.ru
- Чивилихин Сергей Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, chivserg@mail.ru
- Гусаров Виктор Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, заведующий кафедрой, доктор химических наук, член-корреспондент РАН, VVGusarov@mail.eltech.ru

УДК 616-71; 608-2

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ ЕРІ-ОТОБРАЖЕНИЯ А.О. Казначеева

Рассмотрены способы молекулярной визуализации с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ). Анализируются возможности эхо-планарного отображения (ЕРІ) для исследования процессов диффузии и построения карт функциональной активности, рассмотрены факторы, влияющие на точность измерений. Предлагаются параметры сбора данных, обеспечивающих точный расчет диффузионных и функциональных карт, проведена оценка полученных результатов.

**Ключевые слова:** магнитно-резонансная томография, диффузия, функциональные карты, качество изображений.

### Введение

Совершенствование аппаратного комплекса, создание новых алгоритмов регистрации и обработки данных делает возможным не только получение анатомических МР-изображений, но и проведение исследований на функциональном уровне. Современные методы томографии позволяют оценивать микроваскулярную проницаемость, нейрональную активность, скорость диффузии, рассчитывать карты распределения метаболитов. Подобные исследования относятся к методам молекулярной визуализации и обладают высокой диагностической значимостью. Интенсивно развивающимися областями МРТ являются изучение процессов диффузии, протекающих в биологических системах и играющих важную роль в их жизнедеятельности, и построение карт функциональной активности мозга [1–3]. Точность измерения коэффициента диффузии и активности мозга зависит как от аппаратного и программного обеспечения МР-томографа, так и от выбранной методики измерений.



## Материалы и методы

Диффузионное движение молекул воды в живых тканях происходит из-за наличия у молекул жидкости кинетической энергии и имеет место как в пределах одной клетки (ограниченная диффузия), так и в межклеточных пространствах среди структур, ограничивающих движение молекул (затрудненная диффузия). Получение диффузионно-взвешенных МР-изображений (ДВИ) позволяет отображать не строение анатомических структур, а броуновское движение в них и оценивать скорости движения молекул в живой ткани [4].

Для количественной характеристики диффузионного движения протонов введено понятие измеряемого (или действительного) коэффициента диффузии ( $ADC$ ):

$$ADC = -\frac{\ln(S/S_0)}{\beta},$$

где  $S_0$  – интенсивность сигнала без действия диффузных градиентов,  $S$  – интенсивность сигнала при действии диффузных градиентов,  $\beta$  – фактор диффузии. Величина  $ADC$  зависит от состава и микроструктуры вещества, в котором диффундируют молекулы воды (рис. 1).

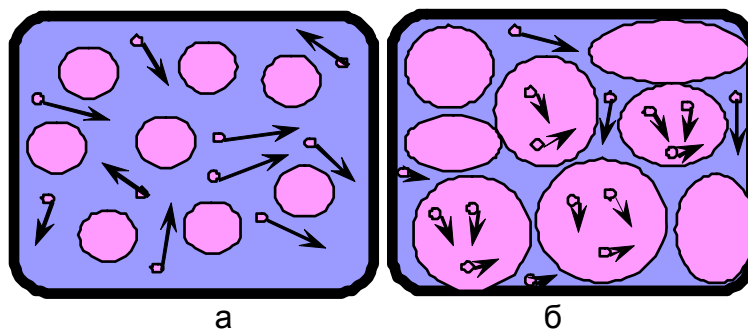


Рис. 1. Диффузия воды в нормальной ткани (а) и снижение диффузии в области поражения (б)

В реальной биологической среде свободному движению протонов препятствуют естественные барьеры (клеточные мембраны, большие белковые молекулы), что приводит к затуханию сигнала. Поэтому измеряемый на практике коэффициент диффузии будет меньше коэффициента диффузии чистой воды при температуре тела. Кроме того, молекулы воды легко диффундируют вдоль нервных волокон, но поперек волокон их движение ограничено миелиновой оболочкой. Зависимость  $ADC$  от направления называют анизотропией диффузии, а измеряемый диффузный коэффициент является тензорной величиной. Для исключения анизотропии диффузного коэффициента и количественной оценки  $ADC$  используют среднее значение диагональных элементов диффузного тензора:

$$ADC_c = -\frac{1}{3}(ADC_{xx} + ADC_{yy} + ADC_{zz}),$$

где  $ADC_{xx}$ ,  $ADC_{yy}$ ,  $ADC_{zz}$  – величины коэффициента диффузии, измеренные при действии диффузных градиентов в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно.

Если рассматривается анизотропия коэффициента диффузии, ее оценивают по формуле

$$A = \frac{\sqrt{\frac{1}{6}[(ADC_{xx} - ADC_c)^2 + (ADC_{yy} - ADC_c)^2 + (ADC_{zz} - ADC_c)^2]}}{ADC_c}.$$

Поскольку практически все патологические процессы сопровождаются изменением скорости движения молекул, сигнал на ДВИ и значение измеряемого коэффициента диффузии обратно пропорциональны друг другу.

Функциональная магнитно-резонансная томография (ФМРТ) позволяет выявить области нейрональной активности мозга, возникающей при действии моторных, сенсорных и других раздражителей, что ранее было возможно только с помощью позитронно-эмиссионной или однофотонной компьютерной томографии [5]. ФМРТ основана на гемодинамическом ответе мозга на увеличение нейрональной активности коры при действии соответствующего раздражителя. Энергообеспечение коры в первые минуты постоянной активности происходит за счет анаэробного гликолиза. Одновременное возрастание перфузии увеличивает транспорт глюкозы из капилляров в нервную ткань, содержание кислорода (в том числе связанного с гемоглобином) при этом увеличивается незначительно. Соотношение оксигемоглобина и дезоксигемоглобина соответственно увеличивается, т.е. происходит относительное снижение концентрации дезоксигемоглобина, выражающееся в усилении сигнала на изображениях, полученных с помощью эхо-планарного отображения (EPI) или градиентных последовательностей. Таким образом, использование градиент-эха EPI-последовательностей позволяет зарегистрировать высокоинтенсивный МР-сигнал от активных участков коры мозга, а контрастность изображений зависит от степени насыщения крови кислородом (BOLD-контраст).

При расчете функциональных карт сопоставляются интенсивности сигналов, зарегистрированных при физиологической нагрузке (активация) и в ее отсутствие. Участки статистически значимого повышения МР-сигнала при активности, выявленные при математической обработке изображений, отображаются на функциональных картах, совмещаемых с анатомическими изображениями (рис. 2). Метод построения карт основан на разности изображений, полученных при стимуляции нейронов, и контрольных, полученных при ее отсутствии.

Данные для ДВИ и функциональных исследований получают с помощью методики EPI, позволяющей получить полный набор данных фазово-частотного распределения МР-сигналов после единичного возбуждающего импульса (рис. 3). Поэтому время регистрации одного EPI-изображения составляет около 1 с, а спин-эхо и градиентное-эхо EPI-последовательности используются для изучения быстротекущих процессов.

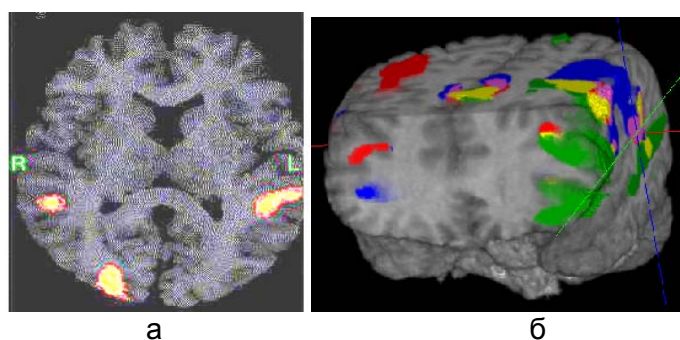


Рис. 2. Совмещенное структурное и функциональное МР-изображение (а) и 3D модель полученных данных (б)

Для получения ДВИ в EPI-последовательность добавлены два дополнительных диффузионных градиентных импульса одинаковой амплитуды  $G$  и длительности  $d$ , благодаря которым получаемые изображения не зависят от плотности спинов, времен релаксации  $T_1$  или  $T_2$ , но зависят от диффузии молекул воды в тканях изучаемого среза, связанной с метаболическими процессами. ДГ можно подавать по любому из направлений  $x, y, z$ . Первый диффузионный градиентный импульс подается перед  $180^\circ$ -м радио-

частотным импульсом и вносит добавочное изменение фазы протонов в исследуемом срезе. Второй диффузионный градиент компенсирует созданный фазовый сдвиг в неподвижной ткани, и регистрируемый сигнал соответствует  $T_2$ -изображениям. Протоны, участвующие в диффузионном движении, имеют некомпенсированные фазовые изменения и дадут меньший МР-сигнал, чем неподвижные.

Изображения, полученные с помощью методики EPI (EPI-импульсные последовательности), характеризуются высокой чувствительностью к скорости исследуемых процессов и низким соотношением сигнал/шум получаемых изображений. Поэтому важным остается вопрос повышения качества изображений и точности измерений.

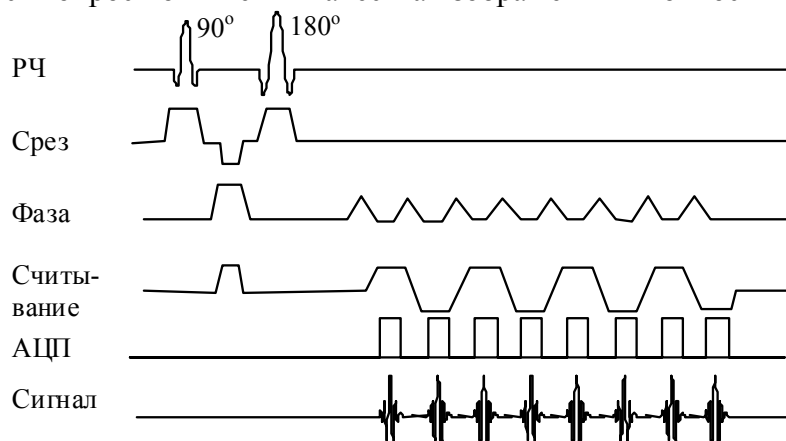


Рис. 3. Схема EPI-импульсной последовательности

### Результаты эксперимента

В работе исследованы возможности повышения точности измерения коэффициента диффузии и расчета параметрических диффузионных карт и построения функциональных карт с помощью EPI-импульсных последовательностей. Анализируемые данные получены на магнитно-резонансном томографе Signa Infinity (General Electric) с полем 1,5 Тл. Параметры сбора данных выбирались таким образом, чтобы достичь оптимального соотношения пространственного разрешения, точности измерений и качества изображений. Для построения диффузионных карт данные получены с использованием DW EPI-импульсной последовательности со следующими параметрами: время эхо-сигнала  $TE = 28$  мс, время повторения  $TR = 8000$  мс,  $\beta = 1000$ , толщина среза 5 мм, поле сканирования  $30 \times 20$  см, матрица изображения  $128 \times 128$ , исследовалась диффузия в направлении осей  $x, y, z$  (рис. 4).

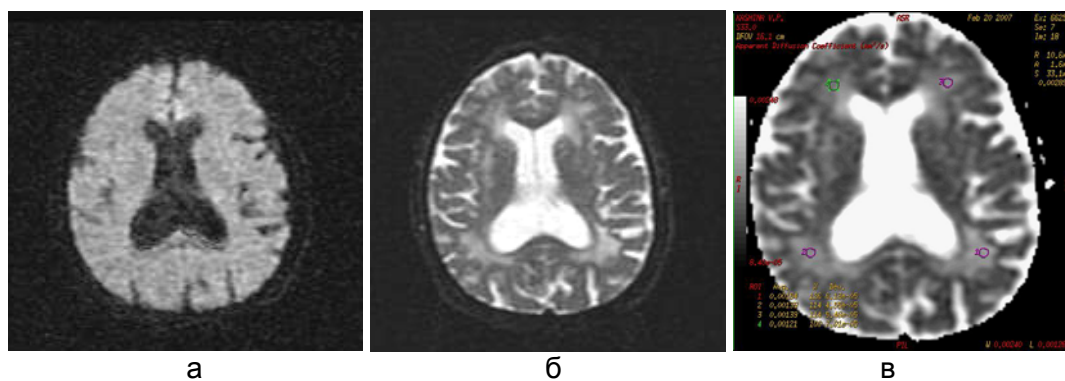


Рис. 4. Диффузно-взвешенное изображение при  $\beta = 1000$  (а),  $T_2$  EPI-изображение при  $\beta = 0$  (б) и рассчитанная карта ADC (в)

Полученные изображения имели достаточное для расчетов пространственное разрешение, не содержали артефактов из-за локальных неоднородностей магнитного поля

и позволяли оценить коэффициент диффузии с требуемой точностью. Увеличение матрицы сканирования привело к увеличению продолжительности исследования и снижению чувствительности метода. Увеличение фактора диффузии, включающего все градиентные эффекты (градиенты считывания и диффузные градиенты) привело к повышению контрастности изображения и чувствительности метода за счет увеличения амплитуды градиентных импульсов. В то же время выбор параметра  $\beta = 1000$  достаточен для выявления изменений скорости диффузионных процессов в тканях. Ошибка измерений коэффициента диффузии для белого и серого вещества головного мозга составила  $\pm 7\%$  по сравнению с известными данными.

Для построения карт функциональной активности использовалась GRE EPI-импульсная последовательность с параметрами:  $TE = 60$  мс,  $TR = 3000$  мс, толщина среза 10 мм, поле сканирования  $24 \times 24$  см, матрица изображения  $64 \times 64$ , количество фаз сбора данных 30. Анализируемые данные получены во время выполнения обследуемым активирующего задания, состоящего из чередования фаз моторной активности и покоя. После окончания обследования проводилась статистическая обработка данных (около 600 изображений для каждой активизирующей команды). Обработка результатов показала, что увеличение поля сканирования приводило к потере пространственного разрешения, увеличение матрицы изображений в два раза вызывало некоторое снижение чувствительности метода и в ряде случаев приводило к отсутствию сигнала от активных областей мозга. Количество фаз сбора данных является достаточным для исследований моторной активности, а время исследования составило около 3 мин. Рассчитанные функциональные карты при совмещении с анатомическими изображениями соответствовали участкам коры мозга, отвечающим за исследуемую функцию; погрешность совмещения составила  $\pm 2$  мм.

### Заключение

Проведенный анализ позволил выявить параметры исследований, обеспечивающие оптимальную чувствительность метода к исследуемым процессам и высокое отношение сигнал/шум. Предлагаемые параметры исследования позволяют повысить точность измерения коэффициента диффузии и определения области функциональной активности мозга. Дальнейшее совершенствование методов молекулярной визуализации связано с увеличением чувствительности к исследуемым процессам и уменьшением артефактов изображений, а также с повышением пространственного разрешения регистрируемых изображений, например, путем их последующей обработки с помощью вейвлет-фильтров [1]. Использование вейвлет-функций для обработки серии функциональных изображений позволит выявить изменение интенсивности МР-сигнала менее 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-08-00922-а.

### Литература

1. Bullmore E. Wavelets and statistical analysis of functional magnetic resonance images of the human brain / E. Bullmore, M. Breakspear, J. Suckling // *Statistical Methods in Medical Research*. – 2003. – Vol. 12. – P. 375–399.
2. Poustchi-Amin M. Principles and applications of echo-planar imaging: a review for the general radiologist / M. Poustchi-Amin, S. Mirovitz, J. Brown et. al // *RadioGraphics*. – 2001. – Vol. 21. – P. 767–779.
3. Корниенко В.Н. Диагностическая нейрорадиология / В.Н. Корниенко, И.Н. Пронин. – М., 2007.

4. Серков С.В. Диффузионно-взвешенная МРТ в диагностике объемных образований задней черепной ямки / С.В. Серков, И.Н. Пронин, Л.М. Фадеева и др. // Медицинская визуализация. – 2004. – № 2. – С. 66–74.
5. Терновой С.К. Применение функциональной магнитно-резонансной томографии в нейрохирургии опухолей головного мозга / С.К. Терновой, В.Е. Сеницын, С.П. Морозов // Медицинская визуализация. – 2002. – № 2. – С. 5–10.

*Казначеева Анна Олеговна*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a\_kazn@mail.ru

**УДК 658.5**

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПУТЕМ КАПСУЛИРОВАНИЯ МАТРИЦЫ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ BGA КОРПУСОВ**

**В.Н. Гераничев**

Проведено исследование процесса капсулирования (Underfill-процесс), использующегося в технологии сборки корпусов микросхем методом перевернутого кристалла (Flip Chip). Предложено использовать Underfill-процесс для долговременной защиты BGA микросхем, эксплуатирующихся в жестких условиях. Определены условия, обеспечивающие стабильность и качество процесса капсулирования крупногабаритных BGA корпусов. Предложена методика и получены экспериментальные результаты по термоциклированию капсулированных и некапсулированных микросхем.

**Ключевые слова:** BGA микросхемы, надежность, процесс капсулирования, термомеханические испытания.

### **Введение**

Потребности современной вычислительной техники, аппаратуры связи и специальной электронной техники в дальнейшей миниатюризации компонентов, повышении быстродействия, увеличении степени интеграции и функциональности привели к созданию семейства интегральных микросхем в корпусах BGA (Ball Grid Array), CSP (Chip Scale Package) и FC (Flip Chip), характерной особенностью которых является наличие на нижней стороне корпуса матрицы выводов в виде шариков припоя. Выводы микросхем используются как для электрического соединения с подложкой, так и для механического крепления к ней. У компонентов в корпусах QFP (Quad Flat Package) дальнейшее увеличение числа контактов до 200 и выше связано с уменьшением шага контактов до 0,4–0,3 мм, что приводит к возрастанию дефектов при пайке. Использование технологии BGA позволяет при тех же размерах корпуса и числе контактов сохранить расстояние между выводами в пределах 1,27–1,0 мм. При этом число дефектов, связанных с установкой BGA на печатные платы, на порядок меньше, чем для микросхем в корпусах QFP [1]. В то же время следует отметить наличие выраженного эффекта «усталости» паяного соединения, обусловленного малой площадью контактирования выводов BGA с печатной платой, что не позволяет разработчикам аппаратуры принять решение о немедленном переходе от корпусов QFP на BGA. Несмотря на многообразие физических параметров, которые влияют на надежность паяных соединений, исследования, проведенные различными авторами, доказали, что основным фактором, определяющим время наработки на отказ электронных изделий, является различие коэффициентов линейного теплового расширения материалов, участвующих в образовании межсоединений.

На рис. 1 показано распределение механических нагрузок в паяном соединении шарикового вывода, вызванных изменением температуры [2]. Такие нагрузки на паяное

соединение в условиях циклических изменений температуры в процессе эксплуатации через некоторое время приводят к появлению в нем микротрещин, их росту и, в конечном итоге, к потере электрического контакта.

Одним из эффективных способов повышения механической прочности паяных соединений шариковых выводов служит капсулирование или Underfill (UF)-процесс, т.е. создание монолитной структуры для системы «микросхема – шарики припоя – контактные площадки – печатная плата» путем заливки в пространство между микросхемой и платой строго дозированного количества специального компаунда-заполнителя. Первоначально капсулирование стало применяться для повышения надежности соединений при установке кристаллов микросхем в корпус CSP методом Flip-Chip (FC), когда расстояние между шариковыми выводами меньше или равно 0,5 мм. Хотя UF-процесс традиционно был частью технологии монтажа FC-компонентов и достаточно отработан, большой интерес представляет расширение области его применения. Главной причиной этого является то, что UF-процесс представляет собой эффективное средство долговременной защиты межсоединений при монтаже высоконадежной электронной техники для жестких условий эксплуатации. Помимо компенсации термомеханических напряжений, заполнитель служит амортизатором для микросхем, испытывающих вибрации и ударные нагрузки, предохраняет от повреждений, связанных с изгибом печатных плат. Без заполнителя эти нагрузки будут полностью прикладываться к паяным соединениям, связывающим компонент и контактные площадки печатной платы.

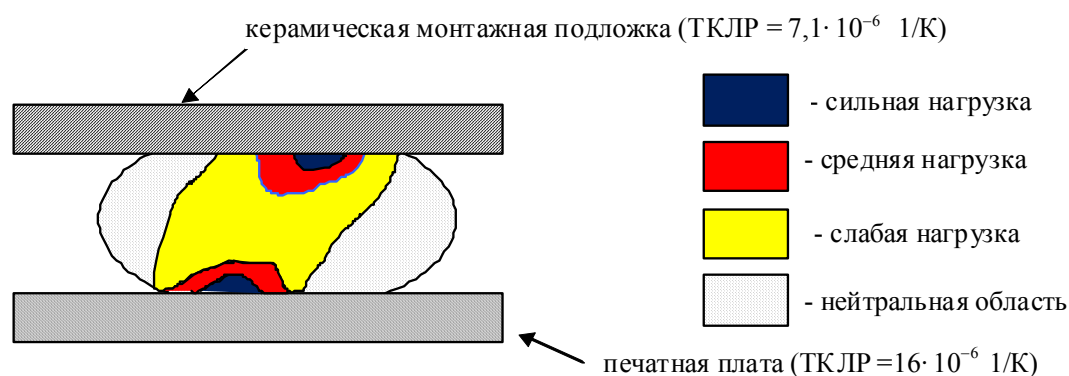


Рис. 1. Распределение механических нагрузок в паяном соединении

Влияние этих факторов возрастает с увеличением размеров микросхем, что ограничивает область применения перспективной элементной базы для жестких условий эксплуатации и делает актуальным дальнейшее исследование UF процесса. Задача, поставленная в работе, состояла в том, чтобы найти и исследовать критические операции и параметры, определяющие качество капсулирования BGA микросхем, имеющих существенно большие размеры, чем CSP и FC. Также была проведена экспериментальная оценка надежности полученных межсоединений.

## Исследование и разработка UF-процесса для защиты крупногабаритных BGA микросхем

### 1. Разработка структурных звеньев UF-процесса

При разработке процесса капсулирования был учтен опыт работы фирмы IBM с микросхемами, предназначенными для Flip-Chip монтажа, когда монтаж кристалла на промежуточную микроплату осуществляется с использованием широко распространенной технологии 4C (Controlled Collapse Chip Connection). 4C технология включает в

себя следующие основные операции: флюсование шариковых выводов кристалла для удаления пленки окислов Pb/Sn и обеспечения паяемости, удаление флюса, переворачивание кристалла, позиционирование его на подложке, осуществление процесса пайки, когда активируется флюс и формируются паяные соединения шариковых выводов кристалла с контактными площадками платы. Интегрированная структура ФС микросхемы образуется после завершения процесса монтажа путем заливки заполнителя в пространство между кристаллом микросхемы и поверхностью подложки и дополнительного нагрева для его полимеризации.

Проведенные в настоящей работе исследования позволили определить основные параметры и технологические операции, определяющие качество UF-процесса.

**Тип заполнителя.** В качестве UF-материала путем сравнения имеющихся данных был выбран однокомпонентный эпоксидосодержащий заполнитель капиллярного действия Underfill Epoxy 623 (UF 623) фирмы AIM. Заполнитель обладает низким поверхностным натяжением, хорошей текучестью и адгезией к пластмассовому корпусу микросхемы и материалу платы FR4. Время полимеризации заполнителя составляет 5 мин. при температуре 150°C. В отличие от UF-материалов фирмы Loctite (марки 3563; 3564; 3565; 3566), имеющих температуру хранения –40°C, UF 623 фирмы AIM может храниться при комнатной температуре. UF 623 ремонтпригоден.

Движение UF-материала затруднено решеткой шариковых выводов, поэтому процесс заполнения пространства под микросхемой занимает значительное время, зависящее от процедуры диспенсирования материала, и устанавливается опытным путем.

**Предварительный подогрев платы.** Подогрев платы уменьшает вязкость используемого материала, сокращает время его прохождения через решетку шариковых выводов, что уменьшает вероятность образования воздушных полостей. Пузырьки воздуха, захваченные в процессе движения заполнителя под микросхемой, поглощают и накапливают влагу, под воздействием которой может произойти отслоение заполнителя от контактирующих поверхностей. В результате термоциклирования в процессе эксплуатации воздушные пузырьки, расширяясь, могут вызвать повреждение компонента и платы (попкорн-эффект). Для заполнителя UF 623 температура предварительного нагрева плат составляет 40–50 °C, для заполнителей фирмы Loctite – 100 °C.

**Процедура диспенсирования материала** состоит из рабочих проходов иглы диспенсера по определенной траектории вблизи края компонента, во время которых происходит сплошное заполнение пространства между компонентом и платой, и окончательного прохода иглы по всему периметру, в результате которого образуется мениск, выступающий за контур микросхемы и компенсирующий краевые напряжения. На рис. 2 приведена схема распределения UF-материала при капсулировании.

Вариант заполнения по схеме б-3 (рис. 2) не годится, так как возрастает риск появления пустот под микросхемой из-за захвата пузырьков воздуха в процессе движения фронтов заполняющего материала. В зависимости от величины промежутка между микросхемой и платой и размером корпуса может потребоваться несколько рабочих проходов перед тем, как произойдет окончательное заполнение подкорпусного пространства.

**Контроль количества заполнителя.** Необходимое количество заполнителя зависит от расстояния между платой и нижней стороной компонента, числа и размеров шариковых выводов и может быть определено вычитанием из полного объема между микросхемой и платой объема всех шариковых выводов. Величина расстояния между микросхемой и подложкой определяется высотой шариковых выводов после пайки, в процессе которой сжатие шариков припоя составляет около 25%. Для микросхем BGA-484 и BGA-256 с диаметром шариковых выводов 0,635 мм расстояние между микросхемой и платой после монтажа уменьшается до 0,48 мм, и расчетный объем заполнителя равен соответственно 0,19 см<sup>3</sup> и 0,1 см<sup>3</sup>. Если количество заполнителя, использо-



ванное при UF-процессе, меньше расчетного значения, то это указывает на наличие пустот под микросхемой. В противоположном случае его излишки распределятся вблизи микросхемы, что ведет к увеличению вероятности отслоения материала от подложки, а также попаданию его на соседние элементы, ухудшая внешний вид печатных узлов.

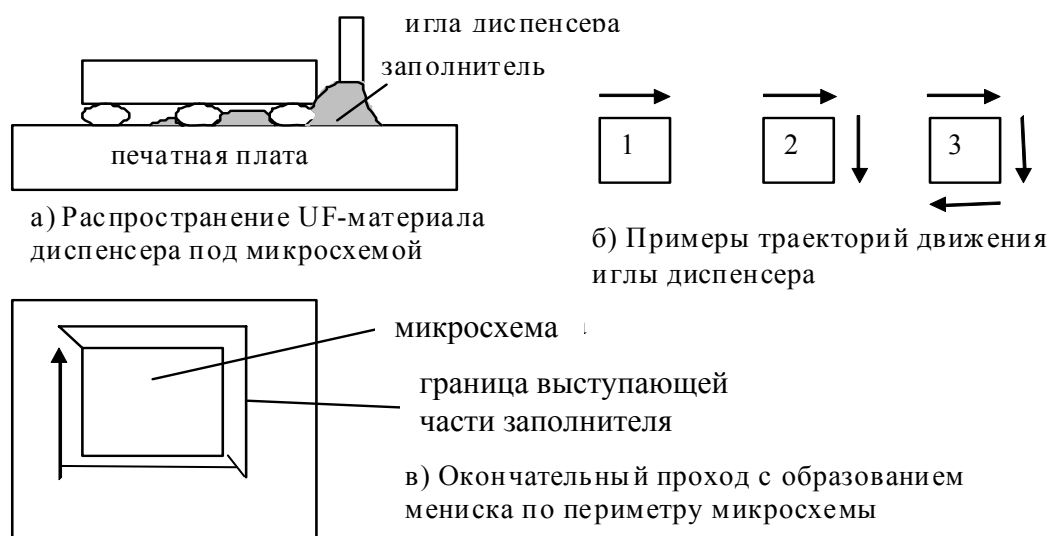


Рис. 2. Схема распределения UF материала при капсулировании

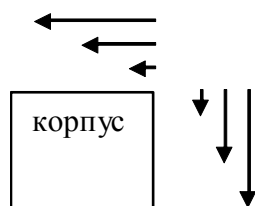


Рис. 3. Направления перемещения иглы диспенсера

Поток UF материала формировался путем многократных проходов иглы диспенсера по двум смежным сторонам микросхемы в направлении от вершины к периферии с постепенным увеличением амплитуды перемещений (рис. 3). Каждый следующий проход начинался после полного затекания UF-материала внутрь решетки шариковых выводов. Высота иглы над платой во время подачи заполнителя поддерживалась на уровне между верхней и нижней поверхностями компонента. Расстояние от края компонента составило 0,4–0,5 мм.

UF-процесс считается завершенным при появлении заполнителя по всей длине двух противоположных сторон по отношению к тем, вдоль которых осуществлялось диспенсирование, и составляет 20 мин. для BGA-484 и 15 мин. для BGA-256. Термообработка заполнителя UF 623 проводилась в конвекционной печи при температуре 150 °С в течение 5 мин. Соблюдение разработанной технологии UF-процесса приводит к полному заполнению матрицы шариковых выводов без образования воздушных полостей под крупногабаритными микросхемами.

## 2. Оценка устойчивости к внешним воздействиям

Пайка микросхем к тестовым платам выполнялась эвтектическим припоем Sn62Pb36Ag2. Установленные на тестовые платы с соблюдением разработанной технологии UF-процесса микросхемы BGA-484 и BGA-256 совместно с аналогичными защищенными микросхемами были подвергнуты ускоренным термоциклическим испы-



таниям путем переноса тестовых плат из камеры тепла в камеру холода в среде «воздух–воздух». Период термоцикла составлял 30 мин. Выдержка плат при максимальной ( $T_{\text{макс}} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и минимальной ( $T_{\text{мин}} = -60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температурах составила 10 мин. Перед изменением полярности температурного воздействия платы в течение 5 мин. выдерживались при комнатной температуре  $T=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Контактные соединения каждой микросхемы были сгруппированы последовательно и соединены кабелем с пультом оператора. Момент возникновения дефекта определялся по погасанию светодиода, включенного в цепь группы контактов соответствующей микросхемы.

В ходе испытаний произошло нарушение паяных соединений в некапсулированных микросхемах BGA-484 на 420-м цикле и микросхемах BGA-256 на 600-м цикле. Испытания капсулированных микросхем были остановлены после проведения 2000 термоциклов. Нарушений соединений в ходе испытаний не зафиксировано. После завершения испытаний верхняя часть микросхем удалялась фрезерованием, а качество заполнения решетки шариковых выводов, наличие трещин в паяных соединениях и расслоений материалов контролировалось с помощью оптического микроскопа послойно с шагом 0,1 мм, начиная от металлизации промежуточной платы BGA компонента до контактных площадок тестовой платы. Слои формировались методом шлифовки.

Проведенные исследования показали наличие трещин в угловых соединениях некапсулированных микросхем BGA-256 и BGA-484 на уровне соединений шариковых выводов с подложкой микросхем.

Внешний вид шариковых выводов в слое, непосредственно прилегающем к металлизированным площадкам промежуточной платы микросхемы BGA-484, после 2000 циклов приведен на рис. 4.

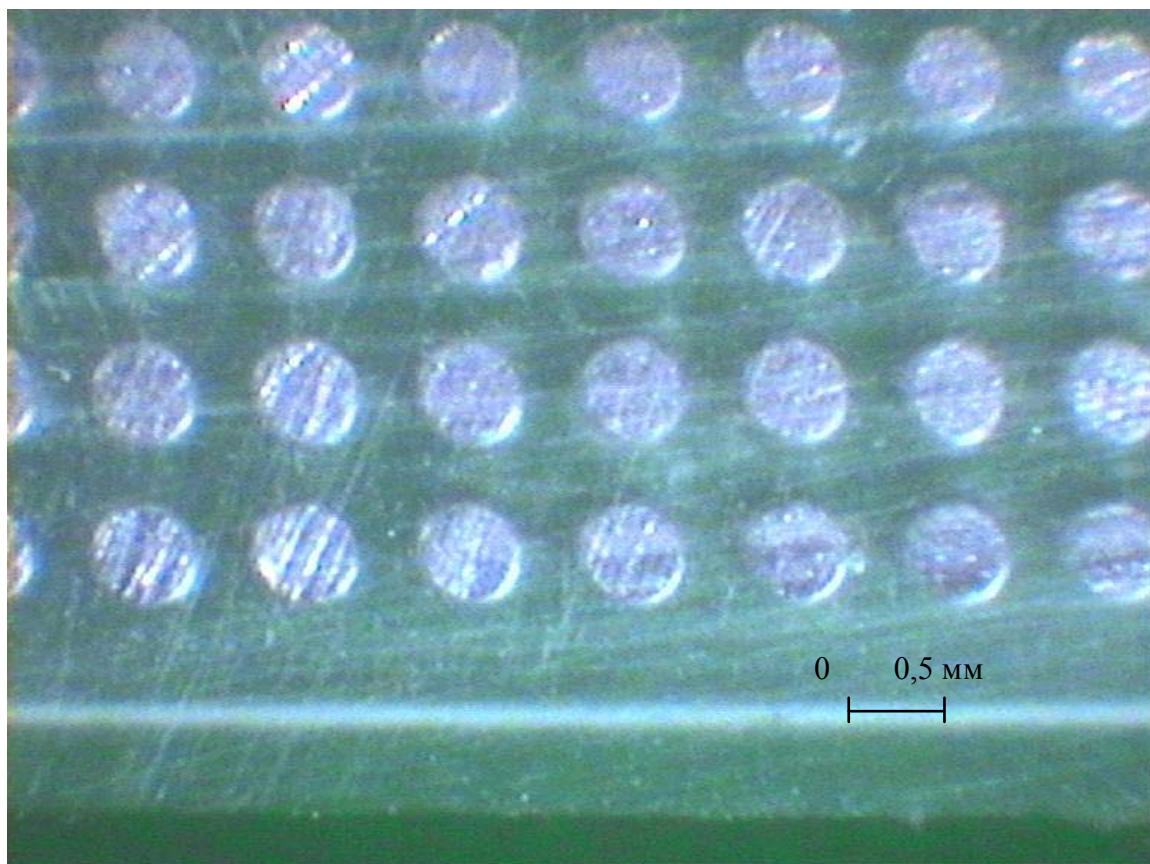


Рис. 4. Вид капсулированных контактов после 2000 термоциклов

В процессе шлифовки отслоений металлизации от промежуточной платы и шариковых выводов не наблюдалось. Шариковые выводы по сечению имеют однородную структуру, без трещин и изменений цвета. Матрица шариковых выводов полностью заполнена UF 623. Воздушные пузыри и включения остатков флюса в структуре заполнителя отсутствуют.

### **Выводы**

Хотя полное понимание механизма возникновения дефектов можно получить только путем детального послойного изучения сечений, в том числе и в вертикальной плоскости, полученные данные позволяют сделать следующие основные выводы:

- разрушение паяных соединений BGA микросхем начинается с угловых контактов и распространяется от внешних контактов к центру микросхемы;
- чем больше габариты микросхемы, тем быстрее возникает дефект при одинаковых условиях эксплуатации;
- использование визуальных методов исследования (микроскоп VS/8) не выявило дефектов паяных соединений капсулированных микросхем и отслоений UF материала от корпуса микросхемы и печатной платы после 2000 термоциклов испытаний.

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение Underfill Epoxy 623 при определенных параметрах технологического процесса для повышения надежности печатных узлов, содержащих крупногабаритные BGA микросхемы,

### **Литература**

1. Leers U. Reliable process for array chips // Electronics production and test. – October, 2000.
2. Popelar S. Flip Chip reliability modeling based on solder fatigue as applied to Flip Chip on laminate assemblies // IMAPS Flip Chip Technology. – March, 2000.

*Гераничев Владимир Николаевич*

– Санкт-Петербургское опытно-конструкторское бюро  
«Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова, гл. технолог,  
geranichev@mail.ru

УДК 004.005

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДОСТУПНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПОСЛЕ КАТАСТРОФ**

С.А. Арустамов

Изложен опыт реализации плана восстановления информационного обеспечения бизнес-процессов после катастроф на примере кредитно-финансовой организации. Приведены основные этапы разработки и внедрения резервной технической инфраструктуры бизнеса, приводятся рекомендации, повышающие качество планируемых мероприятий, предложен формальный критерий качества реализации.

**Ключевые слова:** доступность информации, информационно-коммуникационная структура, план восстановления бизнеса после катастроф, тестирование и верификация решения.

**Введение**

Общеизвестно, что уровень информационной безопасности компьютерных систем достигается обеспечением приемлемого уровня рисков нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информационных ресурсов. Нарушение доступности информационных ресурсов может произойти в результате следующих событий:

- технический сбой аппаратных либо программных средств;
- умышленная атака на ресурсы со стороны внешних или внутренних злоумышленников;
- физическое уничтожение носителей информации или средств доступа в результате воздействия деструктивных процессов или стихийных природных явлений [1, 2].

Классификация возможных масштабов деструктивных событий приведена в табл. 1.

Уровень	Время простоя	Типичные причины	Доступность территории предприятия	Число лиц, затронутых аварией	Воздействие на предприятие
A	Не более 2 часов	Отказ нескольких рабочих станций	Да	Не более пяти	Низкое
B	Не более 8 часов	Отказ сервера, нарушение работы локальной сети	Да	Более десяти	Умеренное
C	Не более 24 часов	Затопление, длительное отключение энергии	Нет	Около 50 % сотрудников	Значительное
D	Более 24 часов	Землетрясение, наводнение, пожар, террористический акт, война	Нет	Большинство сотрудников	Критическое

Таблица 1. Классификация технических сбоев и катастроф

В настоящей статье изложен опыт автора по разработке, тестированию и внедрению плана мероприятий по ликвидации катастроф (англ. DRP, от Disaster Recovery Planning [3]) класса C и D в российском отделении западной кредитно-финансовой организации (КФО) с численностью персонала в 150 человек.

**Предпосылки разработки плана мероприятий по ликвидации катастроф**

Необходимым условием успешной реализации плана мероприятий по ликвидации катастроф является признание актуальности и приоритетности такого проекта руководством предприятия и выделение достаточных бюджетных средств на его реализацию.

Одним из главных факторов является удачный выбор расположения резервного офиса по критерию транспортной доступности, с одной стороны, и достаточной удаленности от основного офиса с целью обеспечения независимости его энергообеспечения и выведения его из зоны поражения, с другой. На практике для мегаполиса идеальным расстоянием между основным и резервным офисом следует считать 5–10 км. Меньшая удаленность не гарантирует сохранность резервного офиса при катастрофе, большая вызывает затруднения не только при реализации плана по факту наступления катастрофического события, но и значительно повышает стоимость тестирования решения при его верификации.

Другим фактором является учреждение (подтвержденное приказом по предприятию) комитета по антикризисному управлению (далее – Комитета), в который обязательно должны входить представители руководства в ранге членов совета директоров и руководители отделов, отвечающие за важнейшие направления деятельности. Для кредитно-финансовой организации такими представителями являются коммерческие и операционные отделы, бухгалтерия, ИТ и служба главного инженера.

### **Аудит информационных ресурсов и определение критического набора бизнес-процессов, необходимых для продолжения деятельности**

На этом этапе принципиальным решением является определение минимального набора бизнес-процессов, которые считаются критическими для предприятия. Для КФО таким решением должен стать ответ на вопрос, является ли критичным поддержание услуги управления счетами клиентов через Интернет, можно ли ввести временный мораторий на специфические услуги, такие как отчеты по клиентским транзакциям в нетрадиционном детализированном формате, и т.п. Очевидно, что признание возможным функционирование КФО с предоставлением ограниченного набора банковских услуг в течение оговоренного времени (например в течение 3–4 месяцев, необходимых для восстановления старого офиса или поиска аренды нового) может значительно удешевить стоимость решения.

Другим важным фактором является оценка минимально возможной численности персонала, необходимого для поддержания бизнес-процессов в восстановительный период. Для удешевления проекта приходится допустить работу в две или три смены и несколько ослабить требования безопасности при выполнении бизнес-процедур (например, отказ от привлечения более чем одного сотрудника к выполнению некоторых критических операций). При этом необходимо строго контролировать уровень изменения рисков нарушения двух других компонентов безопасности (конфиденциальности и целостности информационных процессов) и избегать их недопустимого увеличения при решении задачи экономии ресурсов.

На практике при организации резервного офиса рекомендуется организовать 40–60% рабочих мест сотрудников, а также рассмотреть возможность организации двухсменной работы до полного восстановления технической инфраструктуры предприятия.

### **Планирование информационно-коммуникационной инфраструктуры резервного офиса**

Удачная реализация этапа планирования информационно-коммуникационной инфраструктуры (ИКИ) резервного офиса напрямую зависит от качества инвентаризации информационных ресурсов предприятия и от принятия решения о наборе бизнес-процессов, поддерживаемых после начала реализации DRP. Планирование ИКИ должно охватывать два этапа:

- формирование перечня оборудования, включая ПК, серверы, сетевое и окончное оборудование, учрежденческую АТС (УАТС) с аппаратами, линии передачи данных, осуществляющие связь резервного офиса с партнерами (для КФУ – валютная и фондовые биржи, доступ к системам REUTERS и SWIFT), регуляторами бизнес-деятельности (для КФО – Центральный банк России и налоговые органы), Интернетом, головным офисом (актуально для российских отделений западных КФО) и бизнес-приложениями, размещенных вне территории России.
- разработка политики поддержания актуальности данных (электронных документов, баз данных, содержимого корпоративных почтовых ящиков), необходимых для продолжения бизнеса после наступления деструктивного события.

При формировании перечня оборудования рекомендуется использовать в резервном офисе вычислительные платформы и линии связи с производительностью и пропускной способностью не менее, чем в основном офисе. Более того, заслуживает внимание подход, при котором резервный офис укомплектовывается оборудованием следующего поколения, по производительности превышающим имеющиеся в основном офисе вычислительные мощности. Это позволяет экономить средства на этапе поддержания DRP в актуальном состоянии при плановой смене платформ основного офиса. Следует признать неудачной политику отправки в резервный офис оборудования, списанного в основном офисе в ходе амортизации. Ожидаемая экономия средств на оснащение резервного офиса оборачивается на практике невозможностью обеспечить нормальное функционирование бизнеса после наступления деструктивного события из-за нехватки оперативной памяти, медленного исполнения приложений, несовместимости версий программного и аппаратного обеспечения, сбоев линии связи.

При предварительной настройке рабочих мест в резервной офисе важно соблюдение принципа индивидуальности, учитывающего список локальных приложений и средств доступа к удаленным ресурсам, ориентированных на ведение бизнеса конкретной группы пользователей. При игнорировании этого фактора точная настройка откладывается на период проведения тестирования качества проекта или (что еще хуже) на период после деструктивного события, что задерживает время активации резервного офиса за счет повышения нагрузки на ИТ-специалистов при наличии других неотложных задач.

Политика поддержания актуальности данных резервного офиса должна опираться на классификацию данных по степени важности для бизнеса и частоте их изменчивости. По степени важности для бизнеса данные классифицируются как критические, существенные и некритические, а по частоте изменчивости – как изменяющиеся в реальном режиме времени (динамические), изменяющиеся несколько раз в неделю/месяц (квазидинамические) и изменяющиеся время от времени при наступлении некоторых событий (квазистатические). В зависимости от типа данных применяются различные стратегии их актуализации.

Для критических динамических данных рекомендуется применять технологии переноса изменений, сделанных в основном офисе, в резервный в режиме реального времени, в частности, кластерные решения аппаратного уровня или программные решения, обеспечивающие мгновенную актуализацию (например, пакет Double Take, обеспечивающий «зеркалирование» данных по технологии источник–приемник). При обоих вариантах решения актуальной остается задача создания ежедневных резервных копий данных основного офиса, не связанных с платформами обработки данных (магнитные ленты, внешние диски), для возможности их восстановления при событиях класса А и В, так как технологии зеркалирования не защищают бизнес-пользователей от случайных потерь данных при ошибочных манипуляциях с приложениями.

При реализации программного зеркалирования рекомендуется внедрение двухэтапного процесса: на первом этапе данные зеркалируются с производственного сервера

на резервный, находящийся в основном офисе (необходимый для восстановления данных после событий класса А и В), а на втором этапе передаются на сервер резервного офиса. При таком подходе удастся значительно снизить нагрузку на производственный сервер, так как при одноэтапном зеркалировании непосредственно через канал связи между производственным сервером и сервером резервного офиса бизнес-пользователи чувствуют значительное замедление работы приложений производственного сервера, связанное с замедлениями при удаленной передаче данных от источника к приемнику. При реализации этой технологии немаловажное значение играет обоснованный выбор пропускной способности канала передачи между основным и резервным офисами, который должен осуществляться с учетом объемов данных, передаваемых в реальном режиме времени, и цикличности бизнес-процедур.

Для квазидинамических и квазистатических данных политика актуализации заключается в создании копий на магнитных носителях (ленты, внешние диски) и регулярной их доставке в резервный офис. В ряде случаев приходится идти на разумные компромиссы. Например, несмотря на высокую частоту изменения данных корпоративных почтовых ящиков, которые являются примером динамических данных, их, ввиду среднего уровня критичности, приравнивают к квазидинамическим данным и вместо актуализации в реальном режиме времени применяют еженедельную доставку обновленных копий в резервный офис. Принятие таких компромиссных решений возможно только при условии их утверждения Комитетом с последующим информированием об этом решении бизнес-пользователей. Схема ротации носителей с данными между основным и резервным офисами и их общее количество должна быть строго согласована с принятой политикой восстановления доступности данного типа данных. При этом необходимо помнить об ограниченном ресурсе магнитных носителей при часто повторяющихся процедурах перезаписи и своевременной замене носителей, выработавших свой ресурс.

При оснащении резервного офиса телекоммуникационной инфраструктурой следует руководствоваться следующими принципами:

- заказ каналов передачи данных, голосовой связи и оборудования для телефонизации офиса должен производиться с привлечением провайдеров, не задействованных при оснащении основного офиса;
- при организации тендера на подобные проекты предпочтение должно отдаваться провайдерам, использующим альтернативные арендные мощности и узлы коммутации, находящиеся в районах города, удаленных от районов размещения узлов коммутации провайдеров основного офиса. Желательно также затребовать данные, подтверждающие наличие проекта DRP у претендентов на провайдеры. Последнее обстоятельство актуально при проведении тендера на заключение договоров о предоставлении телекоммуникационных услуг и в основном офисе.

Подобная политика преследует цель уменьшения рисков повреждения технической инфраструктуры провайдера при локализации деструктивного события в пределах некоторой зоны. Ярким примером такого события является «блэкаут» (одновременное прекращение энергопитания во многих районах) Москвы, имевший место 25 мая 2005 г.

### **Документирование процедур DRP и осведомленность бизнес-пользователей**

Важным этапом разработки DRP, во многом определяющим его успешную реализацию, является его детальное документирование, включающее описание отдельных процедур, регламентирование ответственности членов Комитета и сотрудников, реализующих процедуры восстановления, и осведомленность бизнес-пользователей в отношении существования такого плана и перспектив восстановления технической инфраструктуры бизнеса после деструктивных событий. При составлении такого документа

важно детально описать процедуры оповещения сотрудников об объявлении активации плана, места сбора и маршрут следования до резервного офиса. Оповещение сотрудников организуется на основе так называемого «дерева вызовов» (call tree), согласно которому первоначально оповещается ограниченное число ответственных сотрудников, которые, в свою очередь, «спускаясь» по дереву вызовов, доводят информацию до своих подчиненных. Документ должен содержать графическую информацию о месте нахождения резервного офиса и детальный маршрут следования со стрелками, указывающими направление движения. В резервном офисе на каждом рабочем месте необходимо оставить подробную инструкцию, описывающую условия работы в экстремальных условиях на родном языке. Последнее требование специфично для зарубежных организаций, ведущих бизнес на территории России, в которых многие регламентирующие документы составлены на английском языке с целью инспектирования представителями заграничного руководства.

Отдельный документ необходимо подготовить для сотрудников отдела ИТ. В документе необходимо указать последовательность действий по активации ИКИ резервного офиса, которая должна учитывать приоритетность восстановления информации с учетом ее критичности и частоты изменения и способы информирования бизнес-пользователей о готовности отдельных систем к эксплуатации. Особое внимание следует уделить распределению обязанностей и распараллеливанию независимых процессов восстановления данных с целью минимизации времени активации ИКИ и методам быстрого контроля актуальности и целостности данных, переданных в резервный офис по каналу связи, возможности корректного открытия баз данных и других проверок, подтверждающих работоспособность ИКИ.

### **Тестирование работоспособности плана DRP и верификация корректности его реализации**

Отработка основных положений документов для пользователей и служб ИТ проводится в ходе регулярных тестов, имитирующих различные ситуации, возникающие после деструктивных событий. При организации теста отправной точкой является определение модели деструктивного события (например, пожар, уничтоживший все здание). Как это ни парадоксально, отработка тестов по модели полного уничтожения офиса является более простой задачей, чем введение модели частичной деструкции ресурсов (например, затоплен первый этаж, но есть возможность эксплуатации остальных). В последнем случае приходится рассматривать множество вариантов частичного перемещения сотрудников в основной офис и модифицировать бизнес-процессы, объединяющие отделы, оказавшиеся после катастрофы в удалении друг от друга. Это сильно усложняет реализацию единого плана из-за многообразия вариантов частичной деструкции. Практически при тестировании ограничиваются ситуацией полного уничтожения офиса.

Ввиду невозможности совмещения тестирования с повседневными задачами бизнеса тестирование проводится в один из выходных дней, что усложняет задачу проверки процедур взаимодействия с бизнес-партнерами (например, пересылку тестовых платежей в платежную систему ЦБ России). При организации тестирования важно предусмотреть наличие тестовых копий продукционных баз данных с целью исключения искажения бизнес-данных в ходе тестирования, разработать контролируемые процедуры доступа к ним и процедуры возвращения (так называемого «отката») пользователей и ИКИ в обычный бизнес-режим.

В качестве индикатора качества верифицируемого решения можно предложить коэффициент  $K$  количества обращений пользователей к службам ИТ по поводу недоступности данных или невозможности реализации отдельных процедур:

$$K = L / (P \cdot N),$$

где  $L$  – общее число обращений,  $P$  – число тестируемых процедур,  $N$  – число пользователей, участвовавших в тесте.

### Заключение

В работе приведена классификация деструктивных событий, воздействующих на информационное обеспечение бизнес-процедур, разработана методика создания ИКТ резервного офиса, включающая организационные и технические решения, предложен формальный критерий качества решения.

### Литература

1. Шаньгин В.Ф.. Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 544 с.
2. Белов Е.В., Лось В.П., Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А. Основы информационной безопасности: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 544 с.
3. Компания КРОК. План восстановления данных после аварии (DRP) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.croc.ru/solution/it\\_consulting/drp.php#top](http://www.croc.ru/solution/it_consulting/drp.php#top), свободный.

*Арустамов Сергей Аркадьевич*

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, [sergey.arustamov@gmail.com](mailto:sergey.arustamov@gmail.com)

УДК 004.056, 004.77

## ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ С ЦЕЛЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

А.В. Гирик

Рассмотрены современные подходы к анализу трафика в телекоммуникационных сетях, их достоинства и недостатки. Предлагается модель обнаружения информационных угроз безопасности передачи данных в сетях путем построения поисковых прогнозов показателей безопасности и сравнения их с нормальным профилем сети.

**Ключевые слова:** мониторинг вычислительных сетей, анализ и прогнозирование трафика, обнаружение информационных угроз безопасности передачи данных.

### Введение

Обеспечение информационной безопасности – одна из наиболее актуальных и сложных проблем в современных сетях передачи данных [1]. Очевидно, что она должна решаться комплексно, так как:

1. сеть представляет собой совокупность взаимодействующих программных и аппаратных средств, построенных в соответствии с множеством различных стандартов различными производителями, т.е. вычислительную среду с высокой степенью гетерогенности. Специфика каждого сетевого элемента должна учитываться при проектировании системы управления безопасностью сети;



2. сетевое взаимодействие осуществляется по протоколам, принадлежащим определенному сетевому стеку, например, TCP/IP или OSI. Необходимо заботиться о том, чтобы на каждом уровне была обеспечена надежная защита передаваемых данных;
3. наличие разнородных механизмов защиты в сети, их взаимное влияние и влияние на производительность сети должны тщательно исследоваться. Работа различных подсистем безопасности должна быть согласована, что на практике, однако, достигается не всегда [2];
4. при проектировании системы защиты необходимо ориентироваться на статистику угроз и учитывать возможность появления потенциальных (неизвестных) угроз.

Безопасность сети определяется защищенностью всех входящих в нее компьютеров и сетевого оборудования, и злоумышленнику в некоторых случаях может быть достаточно нарушить работу только одного компонента, чтобы скомпрометировать всю сеть [3]. Обеспечение безопасности должно решаться как часть задачи управления сетью. Как правило, эта задача возлагается на специализированный комплекс программных средств, который называется системой управления сетью (Network Management System, NMS) [4].

Система управления сетью берет на себя функцию сбора и анализа сведений о поведении трафика в сети. Это делается, в том числе, и для того, чтобы иметь возможность прогнозировать значения трафика узлов сети. Функции построения прогнозов реализуются в дорогих системах управления сетью в качестве дополнительных модулей. В контексте сетевой безопасности прогнозы используются в основном для обнаружения сетевых аномалий, например, нештатных ситуаций в работе сети, сетевых перегрузок, атак (типа «отказ в обслуживании» и др.) [5].

### **Мониторинг вычислительных сетей**

Рассмотрим кратко современные технологии и подходы к сетевому мониторингу. К числу получивших наибольшее распространение, в том числе использованных во множестве научных исследований, можно отнести:

- мониторинг на основе Simple Network Management Protocol (SNMP);
- мониторинг потоков данных (NetFlow, JFlow, NetStream, sFlow);
- анализ сетевых пакетов;
- трассировка событий сетевого стека (например, с помощью DTrace);
- сквозной мониторинг (на основе ICMP, UDP, TCP);
- инструментирование приложений;
- анализ журналов прикладных и системных программ.

SNMP является стандартным средством сбора информации и управления сетевыми устройствами в сетях TCP/IP [6]. Он работает по схеме менеджер–агент и позволяет управляющей программе (менеджеру) взаимодействовать с агентом (приложением, которое, как правило, входит в состав системного ПО элемента сети, например, коммутатора или маршрутизатора) с целью получить данные о работе устройства или изменить конфигурацию устройства. Все параметры работы устройства содержатся в базе данных, логически организованной в виде дерева. Среди них можно выделить параметры, определенные в одном из стандартов базы (например, MIB-II или RMON2), и параметры, уникальные для каждого типа устройства. Для работы с SNMP существует большое количество коммерческих и бесплатных программ, в частности, пакеты net-snmp и OpenSNMP.

Мониторинг на основе потоков данных приобрел популярность после того, как Cisco Systems реализовала в своих маршрутизаторах протокол NetFlow, позволяющий управляющему приложению (коллектору) получать сведения о потоках IP-пакетов, обработанных устройством. Поток определяется как однонаправленная последователь-

ность пакетов, у которых совпадают IP-адреса и номера портов источника и получателя и тип протокола [7]. Записи протокола NetFlow сохраняют большое количество информации о пакетах, в том числе значение поля ToS, информацию, специфичную для транспортных протоколов, номер автономной системы и многое другое. Поскольку обработка всех пакетов может приводить к большой нагрузке на сетевое устройство, часто используется сэмплирование (sampled NetFlow), когда сохраняется информация лишь о каждом  $n$ -ном пакете. В этом случае сохраненные сведения являются лишь оценками реальных потоков. Популярность протокола NetFlow привела к тому, что комитет IETF создал рабочую группу для разработки универсального протокола экспорта информации о потоках пакетов, обрабатываемых сетевыми устройствами (Internet Protocol Flow Information Export, IPFIX) [8]. Маршрутизаторы Juniper Networks используют похожий протокол JFlow, а устройства Huawei Technologies – NetStream. В сетевых устройствах некоторых производителей, например, D-Link, реализован протокол sFlow, обладающий более широкими возможностями по сравнению с NetFlow [9].

Анализ сетевых пакетов осуществляется с помощью перехватчика пакетов (сниффера). Этот способ позволяет получить любую информацию о проходящих через сетевой стек хоста пакетах, применить сложные алгоритмы фильтрации и поиска нужной информации. Для мониторинга сети в целом он применяется ограниченно в силу следующих причин:

- создает большую нагрузку на систему, резко снижая ее производительность;
- не применим для закрытых устройств типа коммутаторов и маршрутизаторов;
- в сети на основе коммутаторов перевод интерфейса в режим беспорядочного захвата пакетов (promiscuous mode) не позволяет захватывать пакеты, предназначенные другим станциям в сети (хотя эта трудность может быть преодолена с помощью зеркалирования трафика со всех или некоторых портов коммутатора на выделенный порт).

Наиболее популярные снифферы для UNIX-систем – tcpdump и snoot. Многие снифферы используют в качестве основного средства доступа к стеку библиотеку libpcap, портированную на множество платформ, в том числе и MS Windows. Примером приложения, использующего библиотеку libpcap, является сниффер WireShark (ранее Ethereal), названный eWEEK Labs «одним из самых важных open source приложений».

Трассировка событий сетевого стека представляет другой подход к сбору информации о работе элементов сети. Приложения-трассировщики осуществляют мониторинг производимых в системе операций и заносят в журнал временные метки событий, связанных с этими операциями, например, событий установления и разрыва TCP-соединения. Трассировка создает потенциально меньшую нагрузку на систему, чем перехват пакетов, однако в остальном обладает теми же недостатками, что и анализ сетевых пакетов. DTrace является мощным программным комплексом для исследования поведения операционных систем Sun Microsystems с помощью трассировки; в системах, основанных на ядре Linux, может применяться SystemTap, в системах Microsoft – Event Tracing for Windows.

Протокол Internet Control Message Protocol также может использоваться для мониторинга сети, в частности, для получения сквозных показателей функционирования сети. Изменение времени двойного оборота пакетов может свидетельствовать об изменениях в сетевой нагрузке и нагрузке конечного узла. Несмотря на свою популярность в качестве средства тестирования связности, метод на основе ping'a не получил широкого распространения для анализа производительности и построения прогнозов [10]. Для получения оценки времени двойного оборота пакетов могут использоваться также протоколы UDP (например, ответы так называемых well-known services типа ECHO или TIME), TCP, DHCP и вообще любые протоколы, предусматривающие ответ на некоторое сообщение [11].

В случае, если нужна более подробная информация о составляющих времени ответа, необходимо подняться на прикладной уровень и использовать инструментирование приложений [12]. Задача может решаться по-разному в зависимости от того, есть ли доступ к исходным кодам и возможность пересборки приложения или нет. В первом случае предпочтительным способом инструментирования является инструментирование на основе стандартов (например, ARM или AIC), во втором – инструментирование путем внедрения кода или использования возможностей операционной системы (например, отладка) и встроенных в приложение возможностей получения информации о происходящих в нем событиях.

Анализ журналов, или логов, программ (например, анализ логов веб-сервера) может быть полезным источником информации о сетевых событиях, однако в качестве полноценного источника данных о работе сети рассматриваться не может.

Существует ряд способов получения дополнительной информации о событиях в элементах сети, например, использование протокола syslog. Как правило, они применяются для более точной идентификации сетевых аномалий при совокупном анализе с данными по потокам и SNMP-статистикой.

Таким образом, чтобы получить наиболее точную информацию о работе сети, желательно использовать комбинированный подход на основе анализа SNMP-статистики и данных NetFlow [5, 13]. Такая модель находит применение во многих системах обнаружения вторжений в сеть (Network Intrusion Detection System). В общем случае угрозу нужно сначала обнаружить, а затем идентифицировать. Как правило, для идентификации угрозы необходимо больше информации, чем для ее обнаружения, но более информативный мониторинг создает большую нагрузку на сеть и приводит к потерям производительности. Поэтому целесообразно задействовать механизмы подробного анализа после обнаружения угрозы.

### **Анализ данных мониторинга**

Рассмотрим подход к работе с агрегированными источниками данных, использованный при анализе работы сети одного из провайдеров Санкт-Петербурга. В первую очередь, необходимо идентифицировать источники данных. В сетях провайдеров в качестве источников данных выступают управляемое сетевое оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы) и серверы, на которых выполняются ключевые сервисы (биллинговая система, система сбора статистики, файловые, почтовые сервисы и т.д.). В корпоративных сетях в качестве источника данных следует рассматривать также рабочие станции, на которых можно выполнить инструментирование приложений и осуществлять мониторинг действий пользователя (т.е. установить клиентскую часть системы обнаружения вторжений).

Следующим шагом является консолидация данных, поступающих от различных источников, преобразование данных в формат, пригодный для передачи ядру системы обнаружения вторжений, и их запись в хранилище данных. В тех случаях, когда в сети уже настроен и функционирует сервис, выполняющий мониторинговые функции (например, Sacti или Nagios), или полноценная система управления сетью, целесообразно воспользоваться этим обстоятельством и извлекать данные для анализа из баз данных этих систем.

Наиболее сложной частью является собственно анализ. Для статистической системы обнаружения вторжений можно предложить несколько моделей анализа данных, наиболее перспективной из которых представляется анализ временных рядов на основе авторегрессии [14]. Построение прогнозов на основе анализа временных рядов получило значительное распространение в эконометрике и впоследствии стало использоваться и

для моделирования поведения процессов в сетях передачи данных. В общем случае временной ряд может быть представлен мультипликативной моделью вида

$$X(t) = T(t) \cdot C(t) \cdot S(t) \cdot \varepsilon(t), \quad (1)$$

где  $T(t)$  – основная закономерность развития процесса во времени, или тренд,  $C(t)$  – циклическая составляющая,  $S(t)$  – сезонная составляющая,  $\varepsilon(t)$  – случайные колебания. Экспериментальные данные показывают, что в большинстве случаев трафик в сети обнаруживает периодические колебания. Анализ автокоррелограммы позволил выявить сезонные эффекты с периодом 1 час, 24 часа (сутки) и 168 часов (неделя).

Расчет прогноза по методу экспоненциального сглаживания и методу Хольта–Уинтерса позволяет судить о большей точности и гибкости последнего, однако подбор коэффициентов адаптации для каждого ряда представляет собой отдельную сложную задачу. Значение экспоненциально сглаженного ряда рассчитывается как

$$\bar{x}_\lambda(t) = \frac{1-\lambda}{1-\lambda^t} \sum_{m=0}^{t-1} \lambda^m x(t-m), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – параметр адаптации ( $0 < \lambda < 1$ ). Метод Хольта–Уинтерса позволяет учесть сезонные эффекты и ослабить ограничения, присущие методу экспоненциального сглаживания, которые связаны с его однопараметричностью. Прогнозное значение рассчитывается как

$$\bar{x}(t, l) = [a(t) + l \cdot b(t)]w(t + l - T), \quad (3)$$

где  $l$  – шаг прогноза,  $w$  – коэффициент сезонности,  $T$  – число временных тактов, содержащихся в сезонном цикле. Сезонность здесь, как и в (2), представлена мультипликативно. Обновление коэффициентов прогнозирования выполнялось по формулам

$$a(t+1) = \lambda_1 \frac{x(t+1)}{w(t+1-T)} + (1-\lambda_1)[a(t) + b(t)], \quad (4)$$

$$b(t+1) = \lambda_2 [a(t) + b(t)] + (1-\lambda_2)b(t), \quad (5)$$

$$w(t+1) = \lambda_3 \frac{x(t+1)}{a(t+1)} + (1-\lambda_3)w(t+1-T), \quad (6)$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  – адаптирующие параметры. На рисунке представлены графики средней ошибки прогноза  $\bar{e}(l)$ , которая на исследованных наборах данных оказалась меньше для метода Хольта–Уинтерса.

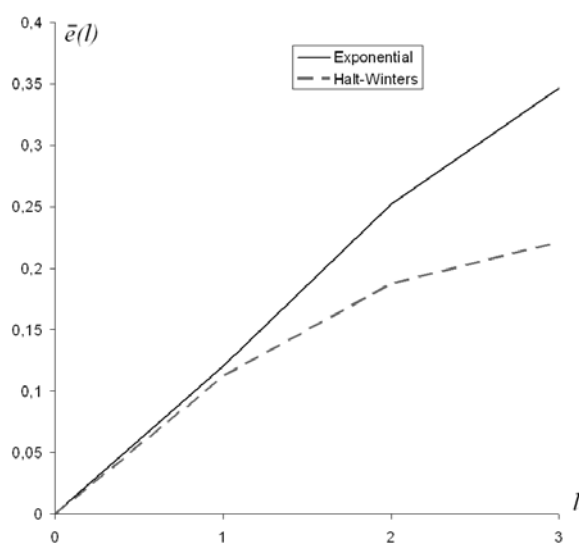


Рисунок. Средняя ошибка прогноза с помощью методов экспоненциального сглаживания и Хольта-Уинтерса на агрегированных данных по трафику в сети

Многошаговое прогнозирование на основе метода экспоненциального сглаживания менее эффективно, так как использует прогнозное значение, рассчитанное на предыдущем шаге, для расчета следующего прогнозного значения, в результате чего быстрее накапливается ошибка. В [13] авторы рекомендуют перейти к аддитивной модели ряда. Это можно сделать, применив, например, аддитивную модель сезонности Тейла–Вейджа.

Нахождение наиболее точного прогноза может решаться как задача оптимизации и заслуживает рассмотрения в отдельной публикации. После того, как прогноз сформирован, его нужно сравнить с нормальным профилем для исследуемого показателя. Нормальный профиль показателя формируется на данных, аккумулированных ко времени построения прогноза, для реальных систем желательно использовать профиль, построенный на данных за несколько месяцев. В эксперименте использовались данные по трафику в сегменте сети, собранные с коммутаторов второго уровня, за период с марта по сентябрь 2008 г.

По результатам сравнения делается вывод о наличии критического отклонения. Если критическое отклонение зафиксировано для нескольких источников данных, становится возможным предпринять действия, которые позволят предотвратить атаку или вовремя информировать администратора сети о возникновении нештатной ситуации.

### Заключение

Предложен подход к разработке системы обнаружения вторжений на основе построения поисковых прогнозов показателей безопасности и сравнения их с нормальным профилем сети. Построение многошаговых прогнозов на основе модели Хольта–Уинтерса позволяет учесть сезонность и получить низкую по сравнению с экспоненциальным методом сглаживания ошибку для двух и более шагов. Если отклонение от ожидаемых значений лежит вне допустимых границ, то нестандартное поведение показателя рассматривается как признак возможной атаки или возникновения нештатной ситуации.

### Литература

1. Жигулин Г.П. Прогнозирование устойчивости субъектов информационного взаимодействия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.
2. V. Paxson Bro: A system for detecting network intruders in real-time // Computer Networks. – 1999. – V. 31. – P. 2435–2463,
3. Зегжда Д.П., Ивашко А.М. Основы информационной безопасности информационных систем. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 449 с.
4. Galis A. Multi-Domain Communication Management. – CRC Press, 2000 – 420 pp.
5. Barford P., Plonka D. Characteristics of Network Traffic Flow Anomalies // Proceedings of ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop, San Francisco, 2001.
6. Harrington D., Presuhn R., Wijnen B. RFC 3411: An Architecture for Describing Simple Network Management Protocol (SNMP) Management Frameworks, 2002. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc3411>, свободный.
7. CAIDA : analysis : workload : flowtypes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.caida.org/analysis/workload/flowtypes/>, свободный.
8. Claise B. RFC 5101: Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol, IETF Proposed Standard, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc5101>, свободный.
9. Phaal P., Lavine M. sFlow version 5, 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.sflow.org/sflow\\_version\\_5.txt](http://www.sflow.org/sflow_version_5.txt), свободный.
10. Internet End-to-end Performance Monitoring [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-iepm.slac.stanford.edu/>, свободный.

11. Well-known services list [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.watchguard.com/help/lss/46/reference/ports4.htm>, свободный.
12. Гирик А.В. Инструментирование клиент-серверных приложений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 19. – С. 150–154.
13. Papadopouli M., Shen H., Raftopoulos E., Ploumidis M., Hernandez-Campos F. Short-term traffic forecasting in a campus-wide wireless network. – 16th Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Berlin, 2005.
14. Гирик А.В. Обнаружение информационных угроз безопасности передачи данных в телекоммуникационных сетях // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2008». – 2008. – С. 178–179.

*Гирик Алексей Валерьевич*

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, преподаватель, alexei.guirik@googlemail.com

УДК 004.722.4

## **ОТСЛЕЖИВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В СТРУКТУРЕ СЕТИ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ДАННЫХ**

**М.Б. Будько, М.Ю. Будько**

Рассматриваются методы обнаружения ширококвещательных штормов и динамического построения топологии сети на основе анализа потоков данных. Рассмотрен механизм обнаружения ширококвещательного шторма в сети, его источника и области поражения. Производится сравнение критериев, обеспечивающих поиск похожих шаблонов трафика.

**Ключевые слова:** безопасность сети, ширококвещательный шторм, топология сети.

### **Введение**

Методы обнаружения ширококвещательных штормов и динамического построения топологии сети актуальны в современных компьютерных сетях, построенных с использованием коммутаторов. В настоящее время широкое распространение получили сети передачи данных, построенные на основе технологии Ethernet. Несмотря на то, что физическая топология таких сетей представляет собой дерево, достаточно большие сегменты могут быть объединены на втором уровне модели OSI. Это приводит к возникновению угроз безопасности, связанных с использованием ширококвещательных и групповых адресов для организации штормов в сети [1]. В связи с этим возникает задача динамического анализа потоков данных с целью обнаружения источников дестабилизирующего воздействия на сеть и определения области поражения.

Существующие способы обнаружения ширококвещательных штормов сводятся к определению интенсивности передачи ширококвещательных пакетов через конкретный порт коммутатора. При превышении некоторого порога пакеты начинают отбрасываться. Однако не все коммутаторы поддерживают такие функции, и, как показывает опыт, они не всегда работают корректно.

Эффективность решения задачи анализа потоков данных зависит от средств и способов мониторинга сетевой инфраструктуры. Как правило, в крупных сетях в качестве основного источника информации используется протокол SNMP. С его помощью собираются сведения о загрузках сетевых интерфейсов коммутирующего оборудования. Сложность анализа потоков данных состоит в том, что устройства опрашиваются системой мониторинга не синхронно, т.е. существует разница во времени между запросом статистики у первого и последнего устройства в списке мониторинга. Для сниже-

ния влияния задержки данные интерполируются до того момента времени, когда начался опрос первого устройства. Это приводит к несоответствию показаний статистики для двух портов, даже если весь трафик с одного из них поступает на вход другого. Соответственно показания, считанные из базы данных системы мониторинга, являются функцией от реальных значений:

$$y(t) = f(t) + \varepsilon,$$

где  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$  – вектор значений временных меток, во время которых инициируется процесс опроса устройств,  $\Delta t = (t_i - t_{i+1})$  – период опроса устройств,  $n$  – количество значений в выборке;  $y = y(t_1, t_2, \dots, t_n)$  – вектор показаний трафика на порту, сохраненных в системе мониторинга;  $f = f(t_1, t_2, \dots, t_n)$  – реальные значения трафика на порту;  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  – вектор случайных компонент, образовавшихся вследствие несинхронного опроса устройств и последующей интерполяции данных.

### Поиск связей между устройствами в сети

Проведено исследование, в рамках которого оценивались следующие критерии обнаружения одинаковых последовательностей трафика:

- коэффициент, вычисленный на основе сумм абсолютных значений остаточных разностей,

$$s_{ab} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_a(i) - y_b(i)}{\max(y_a(i), y_b(i))} \right|;$$

- коэффициент, использующий сумму квадратов отклонений,

$$s_{ab} = \sqrt[2]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_a(i) - y_b(i)}{\max(y_a(i), y_b(i))} \right|^2};$$

- коэффициент, использующий сумму остаточных разностей, возведенную в третью степень,

$$s_{ab} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_a(i) - y_b(i)}{\max(y_a(i), y_b(i))} \right|^3};$$

- выборочный коэффициент корреляции Пирсона

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \times \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \times \sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}};$$

- выборочный ранговый коэффициент корреляции Кендалла [2]

$$r_K = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(q_{(j)} - q_{(i)}).$$

В качестве исходных данных использовались показания загрузки интерфейсов сетевых устройств в распределенной сети. При этом делалась попытка на основе показаний статистики найти связанные друг с другом порты оборудования, так как очевидно, что трафик между ними должен быть одинаковым. Результаты исследования рассмотрены в [3]. Из них можно сделать вывод о том, что наиболее достоверным способом обнаружения одинаковых последовательностей трафика является использование коэф-

фициента ранговой корреляции Кендалла. Его единственным ограничением является требование к объему анализируемой выборки (не менее 15 значений).

### Обнаружение широковещательных штормов

Следующим этапом является применение похожего подхода для обнаружения аномалий трафика на примере широковещательного шторма. Суть этого явления состоит в том, что несанкционированные действия какого-либо узла сети могут привести к увеличению нагрузки на широковещательный сегмент сети, а в некоторых случаях – к перегрузкам и снижению быстродействия других узлов. Это происходит вследствие того, что широковещательный трафик распространяется по всему сегменту и должен быть обработан каждым узлом сети. Пример широковещательного трафика приведен на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что широковещательный шторм имеет свойства, которые могут использоваться для его обнаружения:

- распространяется по всем портам коммутирующего оборудования в рамках одного сегмента;
- является исходящим трафиком для источника и входящим для всех остальных узлов сегмента.

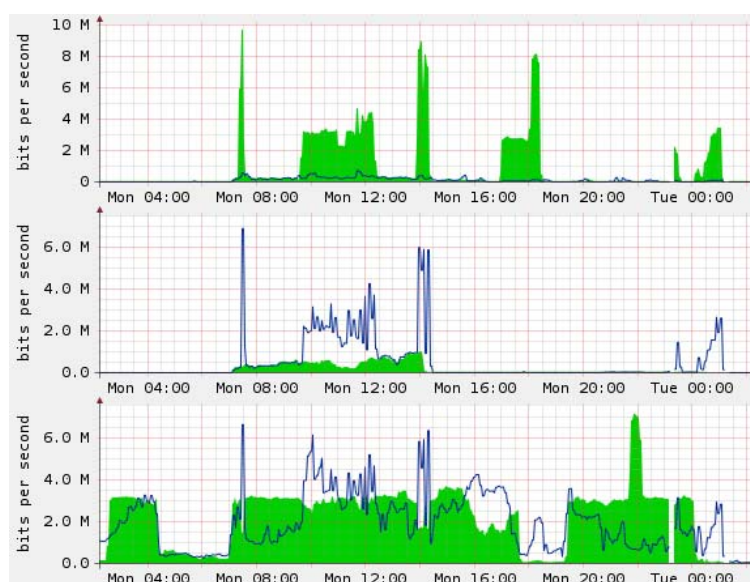


Рис.1. Распространение широковещательного шторма в сети

Следовательно, можно определить последовательность действий по обнаружению широковещательного шторма.

1. Определение уровней иерархии устройств в сети с помощью предварительного построения структуры сети. Построение осуществляется динамически путем сравнения интенсивностей трафика на портах коммутирующих устройств [4]. При этом в качестве коэффициента похожести используется ранговый коэффициент корреляции Кендалла.
2. Анализ трафика на устройствах, находящихся на самом нижнем уровне каждой ветки дерева структуры. Это позволит, с одной стороны, проанализировать все широковещательные домены и, с другой стороны, исключить из рассмотрения сетевое оборудование уровня распределения, так как обнаружить шторм на этом уровне существенно сложнее, чем на уровне доступа.
3. Определение списка устройств, у которых разница между средними на порт значениями трафика предыдущих и последующих отсчетов превысила порог, установленный администратором сети:



$$d = \frac{1}{n_1} \sum y(i) - \frac{1}{n_2} \sum y(i-1),$$

где  $d$  – разница между средними значениями трафика для конкретного устройства,  $y(i)$  – значение отсчета с номером  $i$  на одном из активных портов,  $n_1$  и  $n_2$  – количество активных портов в моменты времени, соответствующие отсчетам с номерами  $i$  и  $i-1$ .

4. Широковещательный трафик воздействует на все активные интерфейсы коммутаторов. Поэтому, несмотря на повышение средней загрузки, ее распределение по портам должно быть равномерным. Для определения этого вычисляем среднеквадратичные отклонения интенсивностей трафика:

$$d_s = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum \left( y(i) - \frac{1}{n_1} \sum y(i) \right)^2} - \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum \left( y(i-1) - \frac{1}{n_2} \sum y(i-1) \right)^2},$$

где  $d_s$  – разница между среднеквадратичными отклонениями,  $y(i)$  – значение отсчета с номером  $i$  на каком-либо активном порту,  $n_1$  и  $n_2$  – количество активных портов в моменты времени, соответствующие отсчетам с номерами  $i$  и  $i-1$ . Если разница среднеквадратичных отклонений будет небольшой, то фиксируется начало широковещательного шторма.

5. Момент окончания шторма определяется, как и начало, только при этом фиксируется уменьшение среднего трафика.
6. Форма шторма определяется по усредненным на порт значениям трафика за время шторма. Это возможно потому, что изменение формы широковещательного трафика будет в большей степени отражаться на суммарном трафике, чем изменение трафика на каком-либо одном интерфейсе.
7. Для поиска источника шторма просматриваем исходящий трафик на всех сетевых интерфейсах в сети. При этом осуществляется сравнение с шаблоном широковещательного шторма. В качестве критерия соответствия используем ранговый коэффициент корреляции Кендалла, который оказался эффективным для обнаружения похожих последовательностей трафика.

### Заключение

Использование рассмотренных методов анализа статистики позволяет повысить информированность администраторов о процессах, которые происходят в сети. Средства динамического построения структуры можно интегрировать в систему управления и наблюдения за сетью и тем самым упростить ее администрирование. Возможность обнаружения широковещательных штормов позволит своевременно принимать меры для устранения источника дестабилизирующего воздействия.

### Литература

1. Библиотека I2R [Электронный ресурс]. Классификация атак. – Режим доступа: <http://i2r.ru>, свободный.
2. Минько А.А. Статистический анализ в MS Excel. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 448 с.
3. Будько М.Ю. Сравнение эффективности критериев для обнаружения связей между устройствами в сети // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2008». – 2008. – Том 1.
4. Пат. 5,926,462 USA, МКИ<sup>6</sup> H04L 12/28. Method of determining topology of a network of objects which compares the similarity of the traffic sequences/volumes of a pair of devices. David Schenkel, Michael Slavitch, Nicholas Dawes, 16.11.1995, 20.07.1999.

5. IEEE 802.1AB. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Station and Media Access Control Connectivity Discovery. – New York, 2005.
6. Казиев В.М. Введение в математику и информатику. – СПб: БИНОМ. Лаборатория знаний; Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, 2007. – 304 с.

*Будько Михаил Юрьевич*

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, bmu@mail.ru

*Будько Марина Борисовна*

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, преподаватель, budkomb@mail.ru

УДК 681.4

## **ВСТРАИВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В АУДИОСИГНАЛ МЕТОДОМ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА**

**А.Г. Коробейников, А.Г. Даурских, Н.В. Павлова**

В работе рассмотрен стеганографический метод внедрения цифровых водяных знаков в аудиосигнал, а также шаги по его практической реализации. Приведена структура работы алгоритма кодирования и декодирования сообщения.

**Ключевые слова:** стеганография, аудиосигнал, метод, цифровой водяной знак, расширение спектра.

### **Введение**

Повсеместное применение компьютерных технологий способствует активному использованию мультимедийной информации, т.е. информации, содержащей звуки, неподвижные изображения, текст, видеоизображения. Легкость распространения такой информации заставляет задумываться о защите авторских прав в каждом из названных видов мультимедийного контента. Из наиболее эффективных способов такой защиты стоит отметить использование методов стеганографии, т.е. встраивания в мультимедийные данные так называемых цифровых водяных знаков (ЦВЗ) – цифровых меток, не видимых без специального программного обеспечения и секретного ключа.

Для каждого вида данных существуют свои методы встраивания ЦВЗ, в которых используются определенные свойства этих данных. Так, для аудиосигналов применяются алгоритмы, основанные на особенностях самих сигналов и системы слуха человека (ССЧ). ССЧ работает в сверхшироком динамическом диапазоне – более чем миллиард к одному в диапазоне мощности и более чем тысяча к одному в частотном диапазоне. Кроме этого, высокой является и чувствительность к аддитивному флуктуационному (белому) шуму. Отклонения в звуковом файле могут быть выявлены вплоть до одной десятимиллионной (на 70 дБ ниже уровня внешних шумов) [1].

Несмотря на это, существуют определенные возможности для скрытия информации в аудиосреде. Хотя ССЧ и имеет широкий динамический диапазон, она характеризуется достаточно малым разностным диапазоном. Как следствие, громкие звуки содействуют маскировке тихих звуков. Кроме того, ССЧ не способна различать абсолютную фазу, распознавая только относительную. Наконец, существуют некоторые виды искажений, вызванных окружающей средой, которые настолько обычны для слушателя, что в большинстве случаев им игнорируются [2].

В работе рассмотрена практическая реализация одного из таких методов, работающего во временной области – метода кодирования с расширением спектра.

## Описание алгоритма

В стандартном канале связи нередко бывает желательным сосредоточить информацию в как можно более узком диапазоне частотного спектра, например, чтобы сохранить имеющуюся полосу пропускания и уменьшить мощность сигнала. С другой стороны, основной метод расширения спектра предназначен для шифрования потока информации путем «рассеивания» кодированных данных по всему возможному частотному спектру. Последнее делает возможным прием сигнала даже при наличии помех на определенных частотах.

В работе рассматривается алгоритм расширения спектра прямой последовательностью (РСПП). Методы РСПП расширяют сигнал данных (сообщения), умножая его на элементарную посылку – псевдослучайную последовательность максимальной длины, модулированную известной частотой.

Поскольку аудиосигналы, используемые в качестве контейнеров, имеют дискретный формат, то для кодирования в качестве элементарной посылки можно использовать частоту дискретизации. Как следствие, дискретный характер сигнала устраняет наиболее сложную проблему, которая возникает при получении сигнала с расширенным прямой последовательностью спектром, – корректное определение начала и конца составляющих элементарной посылки с целью фазовой синхронизации. Следовательно, возникает возможность использования намного более высокой частоты следования элементарных посылок и, таким образом, получения значительной скорости передачи данных. Кроме этого, также могут применяться разнообразные алгоритмы блокирования сигнала, однако в вычислительном плане они являются достаточно сложными.

В РСПП для шифрования и дешифрования информации необходим один и тот же ключ – псевдослучайный шум, который в идеальном случае имеет плоскую частотную характеристику во всем диапазоне частот (так называемый белый шум). Ключ применяется к скрываемой информации и трансформирует ее последовательность в последовательность с расширенным спектром.

Метод РСПП по отношению к аудиосигналам заключается в следующем. Сигнал данных умножается на сигнал несущей и псевдослучайную шумовую последовательность, характеризующуюся широким частотным спектром. В результате этого спектр данных расширяется на всю доступную полосу. В дальнейшем последовательность расширенных данных ослабляется и прибавляется к исходному сигналу как аддитивный случайный шум (рис. 1).

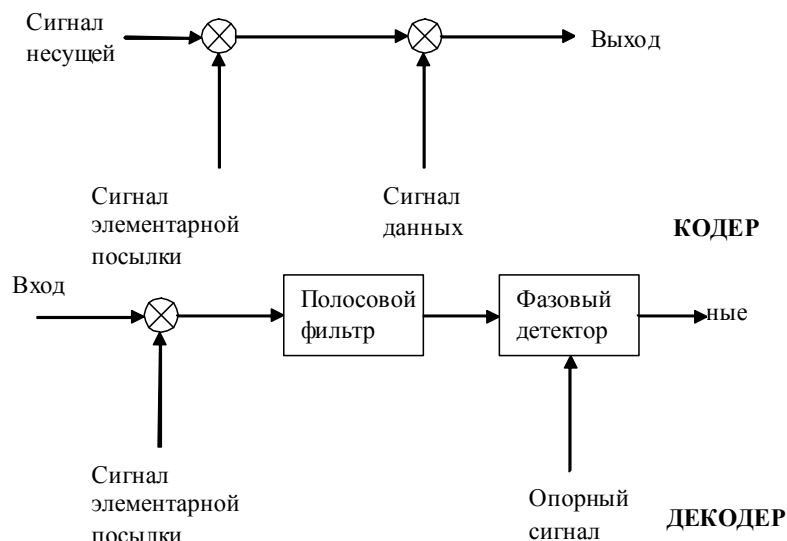


Рис. 1. Структурная схема кодера с расширением спектра

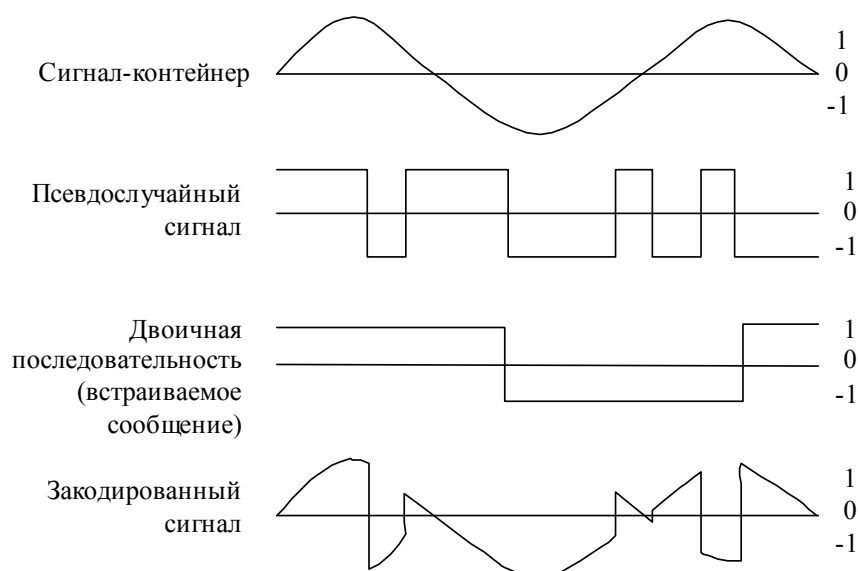


Рис. 2. Информация, синтезированная расширением спектра и зашифрованная методом прямой последовательности

РСПП использует двоичную фазовую манипуляцию, поскольку фаза сигнала псевдослучайной последовательности поочередно чередуется с фазой, модулированной двоичной последовательностью сообщения (рис. 2). На стадии извлечения фазовые значения  $\varphi_0$  и  $\varphi_0 + \pi$  интерпретируются, соответственно, как биты «1» и «0», которыми кодировалась двоичная последовательность данных. При этом предусматривается следующее:

- псевдослучайный ключ представляет собой  $M$ -последовательность (т.е. имеет максимально возможное количество комбинаций, которые равномерно распределены в заданном диапазоне и максимально долго не повторяются). Следовательно, он имеет относительно плоский частотный спектр;
- принимающей стороне известен поток ключей для шифрования, выполнена синхронизация сигнала, а также известны точки начала и конца расширенных данных;
- принимающей стороне также известны частота следования элементарных посылок, скорость передачи данных и частота (вид) несущей.

Объединение несложной техники повторения и кодирования с исправлением ошибок позволяет гарантировать целостность двоичной последовательности. Короткие сегменты двоичной кодовой комбинации объединяются и складываются с сигналом аудиоконтейнера таким образом, чтобы уменьшить шумы переходных процессов. Для этого в процессе декодирования проводится усреднение по всему сегменту.

### Реализация алгоритма

Реализация представленного метода кодирования расширением спектра с помощью прямой последовательности имеет следующие этапы.

#### Шаг 1. Начальные данные:

- считанные и подготовленные аудиоданные из звукового файла, выбираемого пользователем; длина данных  $I$  (в качестве контейнера выберем левый канал стереофайла);
- введенное пользователем сообщение  $M$  длиной  $L_M$  бит.

Для встраивания  $L_M$ -битового сообщения в контейнер, имеющий  $I$  дискретных отсчетов, последний разобьем на  $L_M$  сегментов длиной

$$SegLen = \text{Math.Floor}(I),$$

где  $Math.Floor()$  – функция отсечения дробной части (округление до целого числа в меньшую сторону). Каждый сегмент будет предназначен для встраивания одного бита сообщения.

**Шаг 2.** Для каждого бита сообщения необходимо сгенерировать псевдослучайную последовательность в виде последовательности  $\pm 1$  длиной, как минимум,  $segLen$  элементов. За основу генератора псевдослучайных чисел можно взять регистр сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС). Как известно, РСЛОС состоит из двух частей – собственно регистра сдвига и функции обратной связи (рис. 3). Регистр сдвига представляет собой последовательность битов (разрядов)  $r$ , количество которых  $d$  определяется длиной регистра сдвига. Обратная связь представляет собой сумму по модулю 2 определенных битов регистра (эти биты называются отводной последовательностью) [3].

Теоретически  $d$ -битовый РСЛОС может пребывать в одном из  $2^d - 1$  внутренних состояний, т.е. может генерировать псевдослучайную последовательность с периодом в  $T = 2^d - 1$  бит. Все  $T$  внутренних состояний регистр пройдет только при определенных отводных последовательностях. Такие РСЛОС имеют максимальный период, а полученный при этом результат называют  $M$ -последовательностью. На рис. 3 значения  $\mu_i$  ( $i = 0, 1, \dots, d$ ) являются весовыми коэффициентами полинома степени  $d$ , ассоциированного с последовательностью:

$$p(x) = \mu_0 x^0 + \mu_1 x^1 + \dots + \mu_{d-1} x^{d-1} + \mu_d x^d.$$

Если  $\mu_i = 1$ , то соответствующий ключ замкнут, в случае  $\mu_i = 0$  – разомкнут.

Неудачное включение сумматоров в цепь обратной связи может привести к получению псевдослучайной последовательности, период повторения которой будет меньше максимально возможного при имеющейся разрядности регистра. Чтобы конкретный РСЛОС имел максимальный период, полином  $p(x)$  должен быть примитивным по модулю 2 (т.е. не раскладываться на произведение двоичных полиномов меньшей степени). При этом коэффициенты  $\mu_0$  и  $\mu_d$  всегда равняются 1, поскольку, в случае  $\mu_0 = 0$ , полином  $p(x)$  делится на  $\mu_1$  и не является примитивным. Другие коэффициенты выбранного полинома и будут определять схему формирования псевдослучайной последовательности.

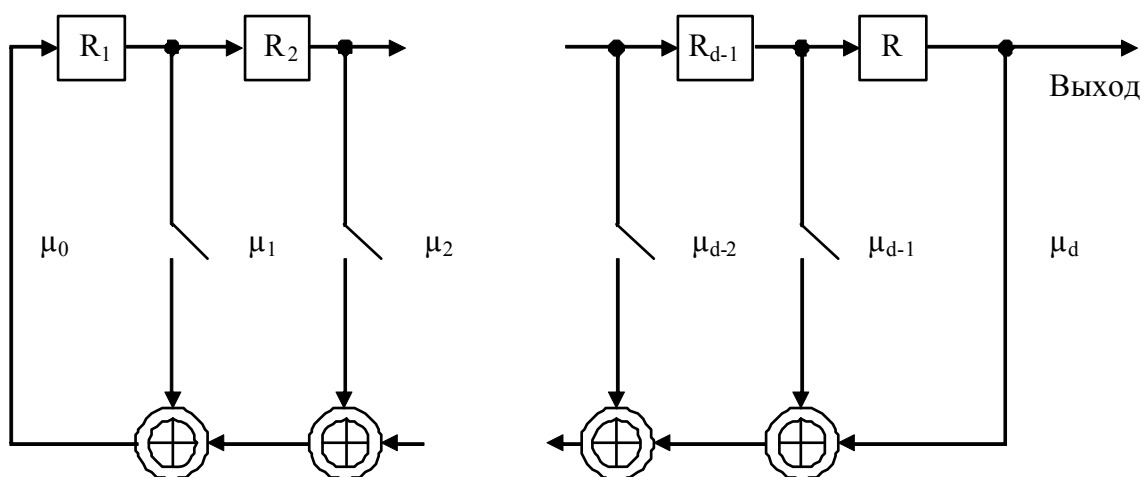


Рис. 3. Обобщенная схема работы регистра сдвига с линейной обратной связью

В нашем случае достаточное количество разрядов регистра составляет  $d = Math.Ceiling(Log2(SegLen))$ , где  $Math.Ceiling()$  – функция округления до целого числа в большую сторону. При этом период генерируемой псевдослучайной последовательности составит  $2^d - 1 > SegLen$ .

Результирующая последовательность определяется наименьшим значащим битом состояния регистра. Руководствуясь достаточностью, процесс генерации длится до получения  $SegLen$  битов псевдослучайной последовательности. На выходе модуля получается последовательность  $\{0, 1\}$ , преобразованная в последовательность  $\{-1, 1\}$ .

**Шаг 3.** На этом этапе выполняется непосредственно встраивание битов сообщения в контейнер. Вначале строка символов сообщения преобразовывается в вектор значений  $\{-1, 1\}$ . На этом этапе можно также применить какой-либо криптографический метод для шифрования встраиваемого сообщения.

Далее весь контейнер делится на количество сегментов равной длины, соответствующее количеству битов во встраиваемом сообщении, т.е. для одного бита сообщения отводится один сегмент. Каждый полученный бит накладывается с помощью соответствующей сгенерированной псевдослучайной последовательности на один сегмент исходного контейнера путем модификации каждого 16-битного отсчета внутри сегмента. При этом энергию ЦВЗ задает параметр  $alpha$ . Он выбирается исходя из требований стойкости встраиваемого ЦВЗ и незаметности модификации носителя. Этот параметр можно рассматривать как уровень шума (в процентах), вносимого при встраивании сообщения, по отношению к исходному сигналу. Рекомендуемое значение – порядка 0,01 (что соответствует примерно 1 % искажения исходного контейнера).

Модифицированные сегменты далее объединяются в общий вектор. После встраивания последнего бита сообщения это вектор удлиняется до длины исходного сигнала конечными, не претерпевшими модификации элементами начального контейнера. При большом значении параметра  $alpha$  увеличивается вносимый в исходный контейнер аддитивный шум, что приводит к ощутимым на слух искажениям, которые также можно наблюдать на временных диаграммах.

После встраивания ЦВЗ измененный контейнер объединяется со вторым немодифицированным каналом и записывается в WAV-файл.

**Шаг 4.** Процесс извлечения заключается в следующем. После открытия файла, содержащего ЦВЗ, из массива данных выделяется левый (первый) канал, в который было произведено встраивание. Принимающая сторона должна иметь оригинальный аудиофайл, из которого тоже извлекается соответствующий аудиоканал. Известным также должно быть число  $SegLen$ , представляющее количество 16-битных отсчетов в одном сегменте.

Считывание ЦВЗ производится с использованием той же псевдослучайной последовательности, что и при встраивании сообщения в сигнал. Определение закодированного значения «0» или «1» происходит на основе анализа разницы между исходным и модифицированным сигналами. Поочередно анализируются все сегменты. В качестве определяющего фактора выступает знак разницы сигналов: если он отрицателен, то встроено значение «0», если положителен – значение «1». Сравнение производится по усредненным значениям всего сегмента, что повышает стойкость к помехам, которые могут возникнуть при передаче сигнала.

В случае применения криптографической защиты при встраивании сообщения извлеченные данные расшифровываются.

### Заключение

В работе рассмотрены основные шаги практической реализации алгоритма встраивания ЦВЗ в аудиосигнал методом расширения спектра прямой последовательностью. Выбранный алгоритм имеет отличные показатели скрытности и устойчивости к преобразованию.

Стоит отметить, что применение комбинированных методов защиты – криптографических и стеганографических – является удачным решением, повышающим стой-

кость встроенных данных к обнаружению, модификации, уничтожению, обеспечивая защиту данных одновременно на нескольких уровнях.

Перспективы развития стеганографических методов защиты авторских прав предполагают их дальнейшее изучение с целью увеличения скрытности и стойкости встраиваемой информации, в то время как развитие стегоанализа направлено на поиски новых методик детектирования скрытой информации, ее извлечения и удаления.

### Литература

1. Bender W., Gruhl D., Morimoto N., Lu A. Techniques for Data Hiding // IBM Systems Journal. – 1996. – № 35 (3 & 4). – P. 313–336.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография: Теория и практика. – Киев: МК-Пресс, 2006. – 288 с., ил.
3. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., исправл. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

<i>Коробейников Анатолий Григорьевич</i>	—	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, заместитель директора, доктор технических наук, профессор, Kogobeynikov_A_G@mail.ru
<i>Даурских Александр Геннадьевич</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanya219@gmail.com
<i>Павлова Надежда Валерьевна</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pavlovanv@yahoo.com

УДК 681.3

**АНАЛИЗ ГОТОВНОСТИ МНОГОУРОВНЕВОЙ  
КОММУНИКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ  
СИСТЕМ КЛАСТЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ****В.А. Богатырев, С.В. Богатырев**

Оценена надежность типовых подсистем трехуровневой резервированной коммуникационной подсистемы. Каждый коммутационный узел представляется содержащим базовое оборудование, отказ которого приводит к полному отказу узла, и оборудование, отказ которого влечет неработоспособность соответствующего порта.

**Ключевые слова:** надежность, готовность, отказоустойчивость, коммуникационная подсистема.

**Введение**

Структурная организация коммуникационной подсистемы во многом определяет производительность, надежность и отказоустойчивость компьютерной системы, причем даже в большей степени, чем параметры используемых компьютеров. Высокая надежность компьютерных систем требует резервирования средств обработки, хранения и передачи информации, в том числе коммуникационных узлов и их связей [1]. Для современных корпоративных сетей характерна многоуровневая организация коммуникационной подсистемы с выделением уровней доступа, распределения и ядра [1]. Оценка надежности двухуровневой коммуникационной системы подключения к корпоративной информационной системе серверов, каждый из которых требует подключения к двум коммутационным узлам, рассматривалась в [2].

В статье решаются задачи точной оценки надежности трехуровневой коммуникационной системы с дублированием коммуникационных узлов (коммутаторов, маршрутизаторов и др.) среднего уровня при подключении клиентских компьютерных узлов, а также оценки надежности одно- и двухуровневых коммуникационных систем подключения серверных узлов, требующих дублирования коммуникационных средств нижнего уровня. Подключение клиентских компьютеров осуществляется к коммутационным узлам нижнего уровня без дублирования связей.

**Подсистема подключения клиентских компьютеров**

Типовая трехуровневая дублированная коммуникационная подсистема подключения клиентских компьютеров представлена на рис. 1. Коммутаторы нижнего уровня (КНУ) выполняют функции уровня доступа, коммутационные узлы среднего уровня (КСУ) – уровня распределения, а коммутаторы верхнего уровня (КВУ) – уровня ядра сети. Подключение клиентских компьютеров к КНУ не требует резервирования.

Число портов каждого коммутатора нижнего уровня (используемых для подсоединения компьютеров) будем считать достаточным для подключения к нему  $n$  компьютерных узлов (общее число компьютеров больше  $n$ ). Число портов каждого КСУ равно  $m$ . Число портов каждого КВУ достаточно для подсоединения к нему  $M$  дублированных КСУ. Общее число компьютеров в системе  $Mmn$ , число КНУ –  $Mm$ , число КСУ с учетом их дублирования –  $2M$ , число КВУ – 2. Узлы, включающие каждую пару КСУ и подключенные к ним КНУ и КУ, будем рассматривать как дублированную группу КСУ. В конфигурации выделяется  $M$  групп дублированных КСУ.



Проведем оценку надежности трехуровневой коммуникационной системы с дублированием коммуникационных узлов среднего уровня, но без резервирования КВУ. Компьютерные узлы считаются равноправными с одинаковыми параметрами надежности. Отказы всех компонент коммуникационной подсистемы примем независимыми. Взаимосвязь между любой парой компьютерных узлов предположим равновероятной.

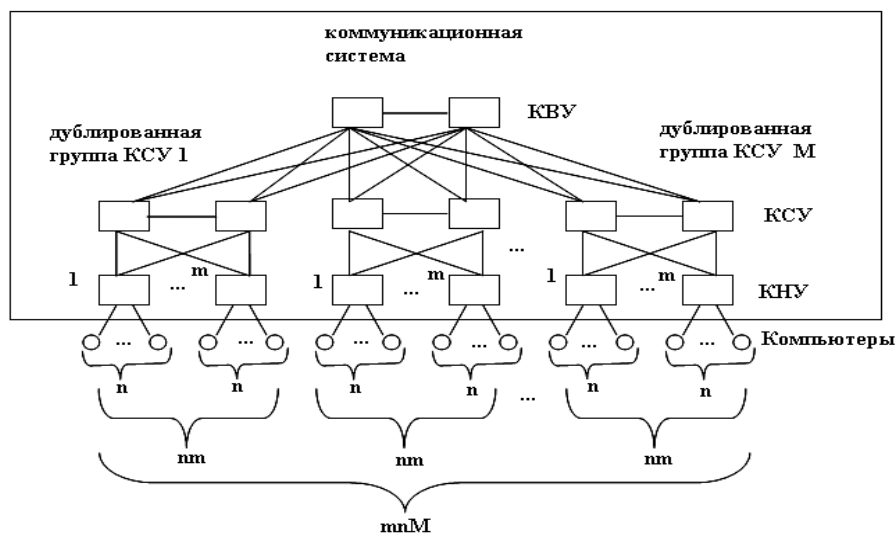


Рис.1. Типовая структура трехуровневой коммуникационной подсистемы подключения клиентских компьютерных узлов

Условия работоспособности коммуникационной подсистемы могут включать требования связанности:

- между любой парой компьютерных узлов;
- всех дублированных групп КСУ через КВУ при допустимости связи с КСУ части КНУ внутри каждой дублированной группы;
- всех дублированных групп КСУ через КВУ при связи с КСУ всех КНУ внутри каждой дублированной группы, но допустимости потери связанности с КНУ части подключенных к нему компьютерных узлов.

При построении модели надежности в каждом коммутационном узле выделяется некоторое общее (базовое) оборудование, отказ которого приводит к полному отказу узла, и оборудование, отказы которого приводит к потере работоспособности отдельных портов. Таким образом, возможны работоспособные состояния коммуникационной системы, при которых каждый отдельный коммутатор не поддерживает требуемой связанности, а она обеспечивается совокупностью частично работоспособных коммутаторов.

Связанность коммутатора с компьютерным узлом нарушается при отказе любого элемента цепи «сетевой адаптер–линия связи–порт коммутатора» (СА–Л–ПК). Связанность между коммутационными узлами нарушается при отказе любого элемента цепи «порт коммутатора–линия связи–порт коммутатора» (ПК–Л–ПК). При оценке надежности в каждой из  $M$  дублированных групп КСУ воспользуемся методом разложения относительно особых элементов, в качестве которых выберем пару коммутаторов среднего уровня. С учетом функциональности конфигурации при связанности КВУ с требуемым числом компьютеров в каждой из  $M$  групп (пар КСУ и подключенных к ним КНУ) вероятность работоспособности конфигурации (коэффициент готовности) равна

$$P_1 = p_B [r_{1c}P_{1c} + r_{20c}P_{20c} + r_{21c}P_{21c}]^M,$$

где для каждой из  $M$  групп КСУ–КНУ  $r_{1c} = 2p_c(1 - p_c)$  – вероятность исправности одного (любого) из двух КСУ, а  $r_{20c} = p_c^2(1 - p_k)$  и  $r_{21c} = p_c^2 p_k$  – вероятности исправности

обоих КСУ соответственно при отказавшей и исправной горизонтальной связи между ними, при этом  $p_c$  и  $p_B$  – надежности базового оборудования КСУ и КВУ,  $p_k$  – надежность связи ПК–Л–ПК.

При исправности одного (любого) из двух КСУ группы в ней обеспечивается связанность, если требуемое число коммутаторов нижнего уровня подключено к исправному КСУ группы, а он имеет соединение с функционирующим КВУ. Вероятность этого события  $P_{1c} = p_k R_1$ , где  $R_1$  – вероятность подключения не менее требуемого числа КНУ к исправному КСУ. Если работоспособность системы обеспечивается при связанности с КСУ не менее чем  $m_1$  из  $m$  КНУ, то

$$R_1 = \sum_{i=m_1}^m C_m^i p_a^i (1-p_a)^{m-i}, \quad (1)$$

где  $p_a$  – надежность КНУ с учетом исправности его базового оборудования и требуемого числа подключенных к нему компьютеров по связи СА–Л–ПК. Если для каждого КНУ требуется связанность не менее чем с  $n_0$  из  $n$  подсоединенных к нему компьютеров, то

$$p_a = p_H \sum_{i=n_0}^n C_n^i p_0^i (1-p_0)^{n-i}, \quad (2)$$

где  $p_H$  – надежность базового оборудования КНУ,  $p_0 = p_{ca} p_l p_{pk} p_{comp}$  – надежность цепи «компьютер ( $p_{comp}$ )–сетевой адаптер ( $p_{ca}$ )–линия связи ( $p_l$ )–порт КНУ ( $p_{pk}$ )». Без учета компьютеров  $p_0 = p_{ca} p_l p_{pk}$ . Надежность связи ПК–Л–ПК  $p_k = p_l p_{pk}^2$ .

При исправности обоих КСУ группы и отказе горизонтальной связи между ними необходимая связанность в группе обеспечивается, если при подключении к исправному КВУ одного из КСУ группы с ним связано как минимум требуемое число КНУ. Необходимая связанность в группе обеспечивается также, если при подключении к единственному исправному КВУ обоих КСУ группы число подключенных хотя бы к одному из них КНУ не меньше требуемого:

$$P_{20c} = 2p_k (1-p_k) R_1 + p_k^2 R_2,$$

где  $R_1$  определяется по (1),  $R_2$  – вероятность подключения каждого из не менее  $m_1$  КНУ группы хотя бы к одному из двух исправных КСУ,

$$R_2 = \sum_{i=m_1}^m C_m^i \left[ \{1 - (1-p_k)^2\} p_a \right]^i \left[ (1 - \{1 - (1-p_k)^2\} p_a) \right]^{(m-i)}, \quad (3)$$

а  $p_a$  определяется по (2). При требовании подключения всех  $m$  КНУ  $R_2 = \left[ \{1 - (1-p_k)^2\} p_a \right]^m$  и  $R_1 = \{p_k p_a\}^m$ . При исправности обоих КСУ группы и горизонтальной связи между ними связанность в группе обеспечивается, если к исправному КВУ подключен хотя бы один КСУ, а число КНУ, подключенных хотя бы к одному КСУ, не меньше  $m_1$ , таким образом,

$$P_{21c} = \left[ 1 - (1-p_k)^2 \right] R_2,$$

где  $R_2$  определяется по (3).

### Подсистема подключения серверов

Двухуровневая коммуникационная подсистема подключения серверов к корпоративной сети с дублированием коммуникационных средств представлена на рис 2, а, а

одноуровневая – на рис. 2, б. Двухуровневая коммуникационная подсистема без резервирования КВУ приведена на рис 2, г.

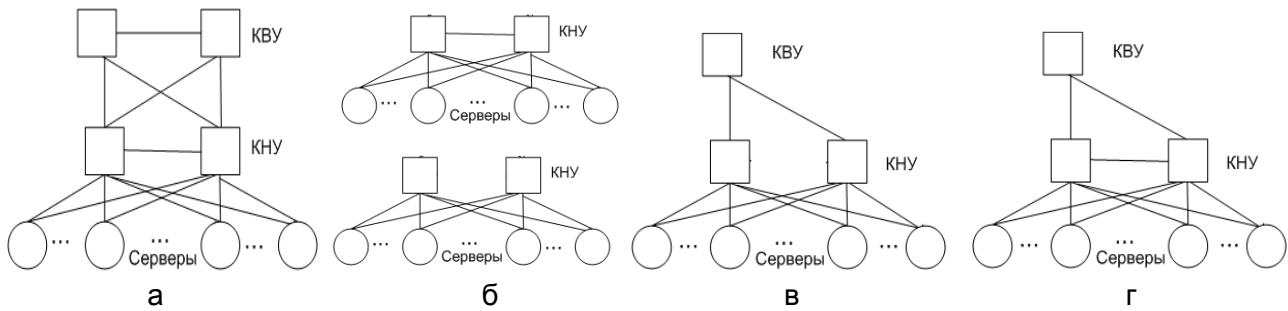


Рис. 2. Типовые двухуровневые и одноуровневые резервированные структуры подключения серверов

### Одноуровневая конфигурация подключения серверов

Рассматриваемые варианты одноуровневой структуры резервированной коммуникационной подсистемы представлены на рис. 2, б. Структура без горизонтальной связи обеспечивает связанность между любой парой из не менее требуемого числа компьютерных узлов, если хотя бы один из дублированных коммутаторов поддерживает связь не менее чем с требуемым числом ( $m$  либо  $m_1$ ) компьютеров.

Вероятность работоспособности анализируемой структуры равна

$$P_1 = 1 - (1 - p_H R_0)^2 = r_1 R_0 + r_2 R_1, \quad (4)$$

где  $p_H$  – вероятность исправности базового оборудования КНУ,  $r_1$  – вероятность исправности одного из двух коммутаторов,  $r_1 = 2p_H(1 - p_H)$ ;  $r_2$  – вероятность исправности обоих коммутаторов,  $r_2 = p_H^2$ ;  $R_0$  – вероятность подключения не менее требуемого числа компьютерных узлов к исправному коммутатору,  $R_1$  – вероятность подключения хотя бы к одному из двух коммутаторов не менее требуемого числа компьютерных узлов,  $R_1 = 1 - (1 - R_0)^2$ .

Если систем должна обеспечивать связанность между всеми  $m$  компьютерами, то  $R_0 = p_a^m$ , где  $p_a = p_{ca} p_l p_{pk}$  – надежность цепи СА–Л–ПК. Если работоспособность системы обеспечивается при связанности не менее чем  $m_1$  из  $m$  компьютеров, то

$$R_0 = \sum_{i=m_1}^m C_m^i p_a^i (1 - p_a)^{m-i}.$$

Надежность одноуровневой коммуникационной системы с дублированием коммутаторов с горизонтальной связью между портами двух коммутаторов вычисляется как

$$P_2 = r_1 R_0 + r_{20} R_1 + r_{21} R_2, \quad (5)$$

где  $r_{20}$  и  $r_{21}$  – вероятность исправности обоих коммутаторов соответственно при отказавшей и исправной связи между ними,  $r_{20} = p_H^2(1 - p_k)$ ,  $r_{21} = p_H^2 p_k$ , при этом  $p_k$  – надежность цепи ПК–Л–ПК;  $p_k = p_l p_{pk}^2$ ,  $R_2$  – вероятность подключения не менее  $m_1$  компьютерных узлов хотя бы к одному из двух исправных коммутаторов, связанных между собой,  $R_2 = \sum_{i=m_1}^m C_m^i [1 - (1 - p_a)^2]^i (1 - p_a)^{2(m-i)}$ . При требовании связанности всех

компьютерных узлов ( $m_1=m$ )  $R_2 = [1 - (1 - p_a)^2]^m$ . В случае дублирования горизонталь-

ной связи между коммутаторами надежность коммуникационной подсистемы  $P_{22}$  определяется по формуле (5), при  $r_{20} = p_H^2(1-p_k)^2$ ,  $r_{21}(t) = p_H(t)^2 [1 - (1-p_k(t))^2]$ .

### Двухуровневые коммуникационные подсистемы подключения серверов

Варианты двухуровневой структура коммуникационной подсистемы без резервирования коммутатора верхнего уровня (КВУ) и дублировании коммутаторов нижнего уровня (КНУ) представлены на рис. 2, в, г.

Структура по рис. 2, в, при отказе коммутатора верхнего уровня или хотя бы одной его связи с коммутаторами нижнего уровня вырождается в структуру по рис. 2, а, без горизонтальной связи, надежность которой определяется по формуле (4). При исправности КВУ, двух КНУ и связей между ними структура по рис. 2, в, работоспособна, если требуемое число компьютерных узлов подключено хотя бы к одному КНУ. При исправности только одного КНУ функционирование структуры сохраняется, если минимально необходимое число компьютеров подключено к функционирующему КНУ. Таким образом, вероятность работоспособности конфигурации по рис. 2, в, вычисляем как

$$P_3 = [(1-p_B) + p_B(1-p_k^2)]P_1 + p_B(p_k^2[r_1R_0 + p_H^2R_2]), \quad (6)$$

где  $p_B$  – надежность базового оборудования КВУ.

Структура по рис. 2, г, при отказе КВУ или хотя бы одной его связи с КНУ вырождается в структуру по рис. 2, б, без горизонтальной связи, надежность которой определяется по формуле (5), таким образом, вероятность работоспособности конфигурации по рис. 2, г, определяется как  $P_{31} = [(1-p_B) + p_B(1-p_k^2)]P_2 + p_B p_k^2 [r_1R_0 + p_H^2R_2]$ .

### Результаты расчета надежности

Расчет проведем в предположении экспоненциального закона вероятности безотказной работы. В этом случае вероятности работоспособности компонент системы за время  $t$  определяются как  $p_H = \exp(-\lambda_0 t)$ ,  $p_B = \exp(-\lambda_0 t)$ ,  $p_{ca} = \exp(-\lambda_{ca} t)$ ,  $p_l = \exp(-\lambda_l t)$ ,  $p_{pk} = \exp(-\lambda_{pk} t)$ ,  $p_a(t) = \exp(-\lambda_a t) = \exp(-(\lambda_{ca} + \lambda_{pk} + \lambda_l)t)$ , где  $\lambda_0, \lambda_{ca}, \lambda_{pk}, \lambda_l$  – интенсивности отказов базового оборудования коммутатора, СА, оборудования порта коммутатора и линии связи соответственно.

Зависимость надежности (вероятности работоспособности) коммутационной подсистемы от времени работы  $t$  (ч.) для рассмотренных вариантов ее построения представлена на рис. 3. Расчеты проведены при требовании связанности всех  $m$  компьютерных узлов, при  $m=16$ ,  $\lambda_0 = 10^{-4}$  1/ч,  $\lambda_k = \lambda_a = 10^{-3}$  1/ч. На рис. 3 кривые 1–3 представляют зависимость надежности  $P(t)$  для конфигураций соответственно по рис. 2, б, с и без горизонтальной связи и с ее дублированием. Кривые 4–5 соответствуют структуре по рис. 3, в, г. Кривая 6 отражает повышение надежности структуры  $D(t)=P_2(t) - P_1(t)$ , достигаемое в результате введения связи между КНУ на рис. 2, б. Кривая 7 показывает рост надежности  $D(t)=P_3(t) - P_1(t)$  в результате введения КВУ без резервирования (разница в надежности конфигураций по рис. 2, б, в). Кривая 8 показывает разницу надежности системы в результате введения дублированной горизонтальной связи между КНУ. Кривая 9 показывает увеличение надежности  $D(t)$ , достигаемое при введении КВУ без резервирования и горизонтальной связи между КНУ. Кривая 10 отражает разницу надежности конфигураций по рис. 2, б, с горизонтальной связью и рис. 2, г. Кривая 11 представляет разницу надежности конфигураций по рис. 2, б, и по рис. 2, г, при дублировании горизонтальной связи между КНУ.

Из представленных графиков видна зависимость роста надежности конфигураций от увеличения их связанности. Таким образом, показана эффективность введения горизонтальной связи между КНУ, так как это позволяет существенно увеличить надежность при минимальных дополнительных затратах. Если в результате введения горизонтальной связи между КНУ не удастся достичь требуемого уровня надежности, то эту связь следует резервировать.

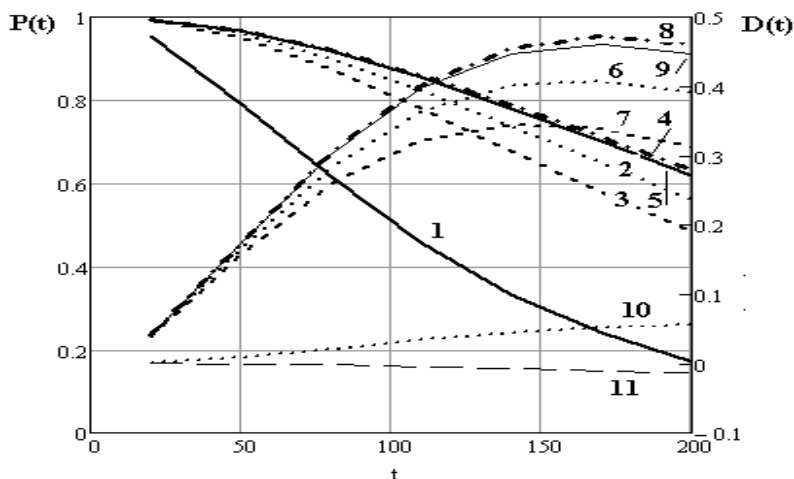


Рис. 3. Результаты оценки надежности

### Заключение

Предложена оценка надежности типовых подсистем трехуровневой резервированной коммуникационной подсистемы, на основе которой проанализированы различные варианты введения избыточности в многоуровневых коммуникационных подсистемах подключения клиентских и серверных узлов. Результаты исследований могут использоваться при обосновании выбора конфигурации коммуникационной подсистемы требуемой надежности для отказоустойчивых компьютерных систем.

### Литература

1. Ретана А. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей. – М.: Вильямс, 2002. – 367 с.
2. Богатырев В.А. Надежность многоуровневой дублированной отказоустойчивой коммуникационной подсистемы // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 4. – С. 24–32.

**Богатырев Владимир Анатольевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, bva@tinuviel.ru

**Богатырев Станислав Владимирович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, realloc@gmail.com

## СИСТЕМА ОБНОВЛЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЛУЧ–2

А.О. Ключев, Е.В. Петров

Статья посвящена проблеме обновления программного обеспечения в распределенных управляющих системах (РУС). Проводится краткий обзор существующих средств программирования РУС. Предлагается способ программирования, использующий понятие целей, объединяющих сходные по своим свойствам ресурсы РУС, загрузочные модули, содержащие программируемые данные и управляющую программу, и простую виртуальную машину LVM, интерпретирующую загрузочные модули.

**Ключевые слова:** обновление программного обеспечения, виртуальная машина, встраиваемая система, интерпретатор, загрузочный модуль.

### Введение

Задача обновления программного обеспечения возникает в любой системе, имеющей программную составляющую, независимо от того, является ли эта система распределенной, управляющей или встроенной, так как даже после сдачи готовой системы в эксплуатацию возникает необходимость замены программного обеспечения элементов системы. Это может происходить по нескольким причинам: исправление обнаруженных в программе ошибок, добавление новых функций в систему в связи с ее развитием и т.д. Если элементов системы, нуждающихся в обновлении программного обеспечения (ПО), немного (несколько единиц), то замену ПО можно провести стандартными (штатными) средствами. Данный способ требует наличия квалифицированных специалистов, способных выполнить действия по перепрограммированию контроллера узла системы и дополнительного оборудования – компьютера, источника питания и т.д., необходимого для этой операции. Если же система состоит из множества (десятков, сотен) элементов, появляется ряд дополнительных проблем: узлы системы могут находиться в различных районах города или даже за его пределами, а доступ к узлам системы может быть затруднен.

На сегодняшний день, с появлением новой элементной базы, все большее развитие получают системы автоматизации и телемеханики на основе проводных и беспроводных каналов связи, таких как Ethernet, CAN, Zigbee, Bluetooth, GSM/GPRS с использованием протоколов TCP, ModBus и других. Такие системы применяются на стационарных и мобильных объектах, используются для сбора телеметрических данных и выполнения функций автоматического управления различными объектами. При этом вопрос замены программного обеспечения в подобных системах в целом не решен. Сегодня для описанного класса систем отсутствуют готовые средства обновления программного обеспечения, и, следовательно, существует потребность в их разработке. Таким образом, задача создания систем обновления программного обеспечения для распределенных управляющих систем на базе смешанных (проводных и беспроводных) каналов связи является актуальной и востребованной. Решению этой задачи, на примере комплекса технических средств (КТС) Луч–2, и посвящена данная статья.

### Комплекс технических средств Луч–2

КТС Луч–2 представляет собой распределенную управляющую систему на базе сетей Интернет и GPRS. Данная система предназначена для управления наружным освещением населенных пунктов, а также для выполнения некоторых функций АСКУЭ. Система включает в себя сервер сбора данных, автоматизированное рабочее место диспетчера и периферийные контроллеры, осуществляющие непосредственное управление освещением.

Основными причинами сложности процесса обновления программного обеспечения большинства распределенных управляющих систем, в том числе КТС Луч-2, являются:

- многообразие и постоянное изменение программируемой элементной базы;
- несовместимость версий ПО элементов системы;
- большое количество элементов системы, требующих обновления ПО;
- повышенные требования к надежности и безопасности процедуры обновления [1].

Главными из них являются многообразие программируемой элементной базы и конфликты версий программного обеспечения. В мире существует большое количество внутрифирменных стандартов загрузчиков, семейство JTAG-стандартов. Большая работа проводится в сегменте массовых, универсальных, офисных вычислительных систем. Но в силу специфики используемой элементной базы они не могут быть применены в полном объеме в КТС Луч-2.

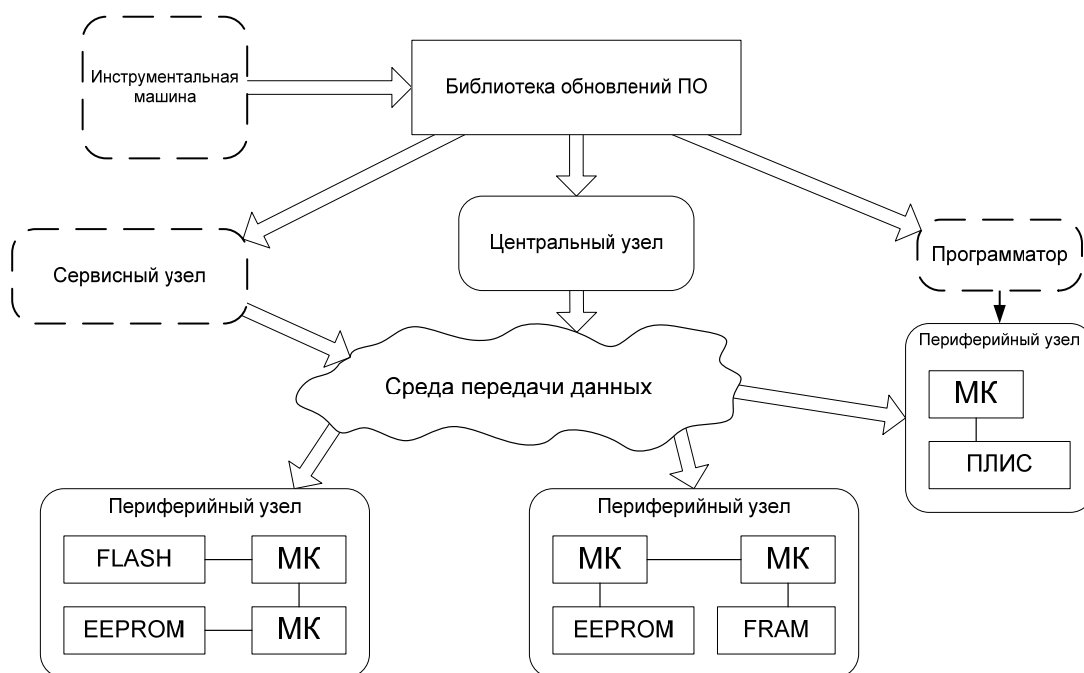


Рис. 1. Схема распространения ПО в КТС Луч-2

На рис. 1 представлена схема процесса обновления программного обеспечения КТС Луч-2. Система обновления включает инструментальную машину, центральный и сервисный узлы, периферийные узлы и среду передачи данных. В качестве среды передачи данных могут выступать как проводные, так и беспроводные каналы связи. Инструментальная машина выполняет функции хранилища программ и данных. Центральный или сервисный узлы осуществляют управление процессом доставки обновлений. Подлежащие обновлению ресурсы находятся в периферийных узлах. Это внутренняя память микроконтроллеров, внешние запоминающие устройства, периферийные контроллеры.

В принципе программирование ресурсов контроллеров может осуществляться локально, с помощью подключаемого внешнего программатора, как показано на рисунке. Задача системы обновления программного обеспечения состоит в доставке данных от инструментальной машины до ресурсов периферийных узлов.

Рассмотрим существующие на сегодняшний день способы замены программного обеспечения, применимые в КТС Луч-2. Средства программирования можно разделить на используемые в режиме разработки и на этапе эксплуатации. В режиме разработки

системы чаще всего используются программатор микросхем и ISP программирование – программирование логических устройств, установленных в законченную систему. Для этого могут использоваться самые различные интерфейсы, как стандартные, так и специализированные. В рабочем режиме используется IAP – процедура программирования логических устройств на этапе эксплуатации. Программирование ведется процессором, исполняющим резидентную программу. При этом данные для программирования могут получаться как «на лету», так и из специального хранилища в контроллере.

### **Концепция цели**

Впервые данная концепция была использована при создании инструментальной системы МЗР для программирования многопроцессорной системы МЗМ, используемой для управления железнодорожными стрелками, в рамках системы КТС ТРАКТ в 1997 г.

Как было сказано выше, одной из главных трудностей замены программного обеспечения элементов распределенных управляющих систем является большое разнообразие используемых программируемых ресурсов. Различные ресурсы имеют различные типы памяти, интерфейсы подключения, быстродействие, адресные пространства и т.д. Для упрощения и унификации работы со всеми ресурсами системы предлагается способ программирования, основанный на понятии цели. Цель – это виртуальное устройство, объединяющее сходные по своим свойствам реальные устройства. Назначение цели – унификация интерфейсов разнообразных устройств. В качестве примеров целей можно назвать цель EEPROM, обеспечивающую доступ к внутреннему EEPROM микроконтроллера и внешней микросхеме EEPROM, цель RAM, обеспечивающую доступ к оперативной памяти микроконтроллера, и т.д. Понятие цели позволяет организовать работу с различными программируемыми ресурсами контроллеров одинаково.

Достаточно близкими (но гораздо более примитивными) аналогиями цели можно считать BSD сокет (1983 г.) и концепцию виртуальной файловой системы, принятой на вооружение фирмой Sun Microsystems еще в 1985 г. [2]. С сокетами цель объединяет понятие порта – связующего звена между потоком данных и процессом. Виртуальная файловая система предоставляет унифицированный способ доступа к неким сущностям, имеющим адресное пространство с возможностью проведения операций позиционирования, чтения и записи. Если посмотреть, на каких моделях вычислений базируется каждая из концепций, нетрудно понять, что сокеты ограничивают наши возможности законами, заложенными в модель вычислений, называемую «сети процессов», а виртуальная файловая система ограничивает нас законами машины фон-Неймана, с ее пассивным адресным пространством.

Наиболее близко к концепции целей подошли в системе моделирования Ptolemy. В этом проекте, разрабатываемом в институте Беркли [3], предлагается актор-ориентированная концепция, позволяющая представить широкий спектр моделей вычислений единообразным способом. Семантика моделей определяется текущей моделью вычислений (в системе моделирования ее задает так называемый директор). В системе Ptolemy у каждой цели может быть своя модель вычислений.

В системе МЗР взаимодействие с целью осуществляется прикладными пакетами, являющимися аналогами токенов системы Ptolemy. Для каждой цели может быть определен уникальный набор команд, позволяющий реализовывать большое количество вычислительных моделей.

### **Порядок обновления ПО**

Программное обеспечение целевого контроллера включает как стандартные загрузчики, так и загрузчики собственной разработки. Необходимость разработки собст-



венных загрузчиков возникает в связи с тем, что использование только фирменных средств приводит к сильному удорожанию аппаратуры контроллеров, а также делает процесс программирования медленным и неудобным. В результате при не очень высокой стоимости реализации собственного загрузчика такое решение оказывается эффективным и дает высокий выигрыш в стоимости и удобстве системы программирования.

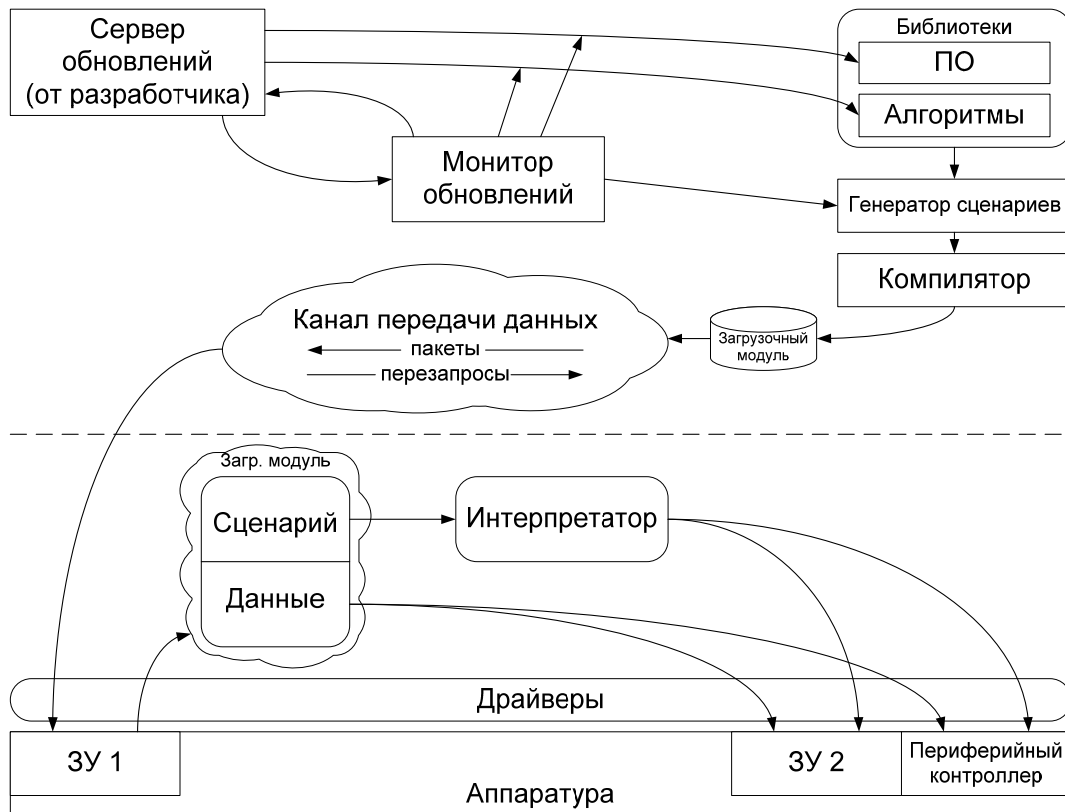


Рис. 2. Схема обновления ПО в режиме эксплуатации

В режиме разработки от системы требуется следующее: программировать целевое программное обеспечение, записывать тестовые данные, конфигурировать элементы системы, а также осуществлять вспомогательные действия для отладочных нужд. Для реализации этих функций удобнее всего воспользоваться описанными ранее целями.

Цели предназначены для решения проблемы разнородности программируемых ресурсов, и их использования достаточно для построения системы обновления программного обеспечения в режиме разработки. Но на этапе эксплуатации к системе обновления предъявляются другие требования – своевременное обнаружение новых версий программного обеспечения, его доставка до целевой системы и корректная установка. Для решения перечисленных задач предлагается решение, использующее монитор обновлений, сценарии программирования, загрузочные модули и интерпретатор сценариев. Схема процесса обновления программного обеспечения КТС Луч-2 в режиме эксплуатации представлена на рис. 2.

Функции монитора заключаются в обнаружении и доставке новых версий программного обеспечения до инструментальной машины. Чуть более подробно рассмотрим понятия загрузочного модуля и сценария программирования. Загрузочный модуль – совокупность данных и инструкций по их размещению. Сценарий программирования – последовательность действий, обеспечивающая программирование ресурсов контроллеров со сложной организацией.

Рассмотрим пример языка сценария, примененный в КТС Луч–2. Для реализации компилятора был выбран язык Форт, позволяющий достаточно легко создавать не-сложные языковые конструкции. Из них составляется сценарий программирования. Таким образом, на этапе компиляции загрузочного модуля работает Форт-система, а на этапе исполнения – виртуальная машина LVM.

Характеристики языка сценария КТС Луч–2:

- простая базовая система команд (стирание, копирование, исполнение);
- расширение системы команд;
- линейное исполнение;
- компиляция в Форт-системе;
- исполнение в виртуальной машине LVM.

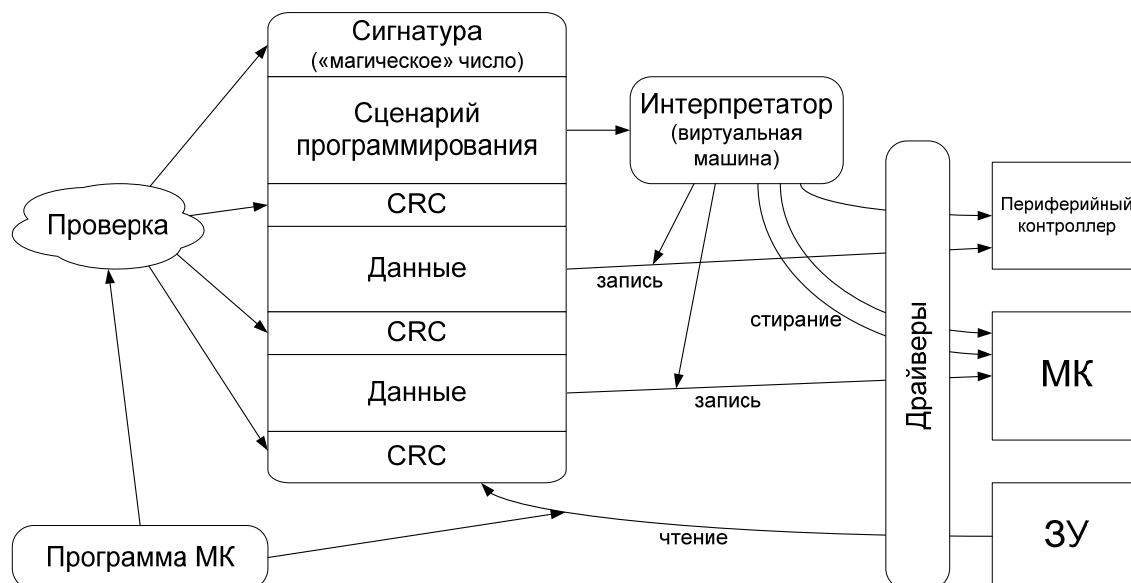


Рис. 3. Схема интерпретации загрузочного модуля в контроллере

На рис. 3 показана схема работы интерпретатора сценариев программирования. Интерпретатор представляет собой виртуальную машину, названную LVM, которая запускается загрузчиком контроллера в случае обнаружения признака необходимости обновления программного обеспечения. Виртуальная машина последовательно исполняет команды сценария программирования, определяемые типом цели. Например, в случае работы с FLASH это могут быть команды: стереть, скопировать, передать управление. Аргументами команд могут быть адреса, а также данные, хранящиеся в блоке данных загрузочного модуля. Данная реализация требует наличия в целевом контроллере промежуточного буфера для хранения загрузочного модуля.

Необходимость разворачивания цельного загрузочного модуля непосредственно на месте вызвана проблемами передачи данных по плохим каналам связи через достаточно большое количество узлов сети. Перечисленные проблемы естественным образом подталкивают нас к использованию принципа слабой связи. Близкими аналогами такой системы являются дистрибутивы Windows (setup.exe) или, к примеру, grm в Linux. В отличие от LVM, разворачивание таких дистрибутивов происходит в рамках виртуальной файловой системы (Linux, Windows) и системного реестра (Windows). В LVM же взаимодействие происходит с различными целями, работающими в рамках различных моделей вычислений.

Одним из важнейших является комплекс вопросов информационной надежности и безопасности обновления программного обеспечения. Для обеспечения безопасности

процедуры замены программного обеспечения в КТС Луч–2 предусмотрен целый ряд механизмов, предотвращающих выход контроллеров из строя. Среди них – контроль целостности данных на этапе доставки загрузочного модуля в контроллер, контроль целостности загрузочного модуля, хранящегося в памяти контроллера, непосредственно перед началом процесса перепрограммирования, а также контроль совместимости версий загрузочного модуля и интерпретатора (виртуальной машины). Кроме того, весь обмен данными между сервером обновлений и контроллерами производится в зашифрованном виде, что делает невозможным подмену программируемого ПО злоумышленниками.

### Заключение

Предложенная система обновления программного обеспечения, реализованная в КТС Луч–2, показала свою высокую надежность и эффективность, уменьшив в сотни раз время (а значит, и стоимость), затрачиваемое на замену программного обеспечения многочисленных контроллеров, рассредоточенных в пределах города. Рассмотренная система также значительно облегчила процесс отладки и тестирования КТС Луч–2 в целом благодаря возможности доступа к любым программируемым ресурсам контроллеров.

Данная система обновления может быть успешно использована как в проводных, так и в беспроводных системах, независимо от географической протяженности. Использование в системе обновления сценариев программирования, загрузочных модулей и интерпретатора сценариев делает ее легко переносимой в другие системы, подобные КТС Луч–2.

### Литература

1. Петров Е.В. Обновление программного обеспечения в распределенных управляющих системах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Выпуск 45. Информационные технологии. – С. 65–70.
2. Kleiman S.R. Vnodes: An Architecture for Multiple File System Types in Sun UNIX // Proc. USENIX, Summer, 1986.
3. Ptolemy Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/>, свободный.

*Ключев Аркадий Олегович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, [kluchev@d1.ifmo.ru](mailto:kluchev@d1.ifmo.ru)

*Петров Евгений Владимирович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [sshhiiccoo@yandex.ru](mailto:sshhiiccoo@yandex.ru)

## **КЛАССИФИКАЦИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЧАСТЯМИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ И ЕГО ОПИСАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ**

**А.А. Ожиганов, А. И. Чепурной**

Приводится классификация связей между элементами приложения и их описание для приложения-примера согласно выполненной классификации. Разработан способ описания связей с помощью модели конечных автоматов. Проведен анализ свойств полученного конечного автомата.

**Ключевые слова:** веб-приложение, конечные автоматы, проектирование программного обеспечения.

### **Введение**

В настоящее время в индустрии разработки программного обеспечения наблюдается значительный рост количества веб-приложений, что делает важной задачу формализации процесса их проектирования, разработки и тестирования. Веб-приложение – это приложение, доступное посредством веб-браузера через сеть (Интернет или локальную корпоративную сеть – Интранет). В процессе работы с веб-приложением пользователь использует веб-браузер, запрашивая документы с веб-сервера, и получает их в ответ. Подобное взаимодействие осуществляется с помощью http-протокола и носит последовательностный характер. Браузер пользователя запрашивает с сервера с помощью http-запроса документ (обычно в формате HTML-кода, возможно, со встроенными мультимедийными компонентами, апплетами и скриптами, но возможны и другие варианты формы ответа – например, XML-документы, изображения, файлы текстовых документов), затем пользователь работает с полученным документом, и, когда в ходе работы оказывается необходимым получить новый документ с сервера (при переходе на новый документ по ссылке, отправке на сервер формы с данными, автоматическом перенаправлении и т.д.), описанный цикл повторяется сначала.

На стороне сервера код HTML-страниц может формироваться статически, при этом клиенту посылаются содержимое хранящихся на сервере файлов с кодом разметки в формате HTML, или динамически, «на лету». Само веб-приложение может выступать в качестве клиента других служб, например, базы данных или другого веб-приложения, расположенного на другом сервере.

### **Проблемы, возникающие в процессе разработки и тестирования веб-приложений**

Одной из проблем в разработке, тестировании и поддержке разработанных веб-приложений является гетерогенный характер их структуры. Компоненты приложения работают на различных аппаратных и программных платформах, написаны на различных языках с использованием различных стилей программирования. Одно приложение может состоять из компонент, написанных на разных языках – процедурных, объектно-ориентированных или гибридных, наподобие JSP. Клиентская часть включает в себя браузеры, исполняемые в их среде встроенные скриптовые языки и апплеты, серверная – HTML, CGI, Java Server Pages, Java Servlets, .NET.

Все эти части взаимодействуют между собой, с программным обеспечением промежуточного уровня, с системами управления базами данных и с другими компонентами, которые могут находиться на стороне клиента, стороне сервера или других компьютерах, связанных с сервером. Кроме того, современные веб-приложения имеют, как правило, способность менять свой графический интерфейс пользователя в зависимости от команд пользователя, состояния клиента, состояния сервера; настольные же приложения обычно имеют полностью статичный интерфейс пользователя.

## Постановка задачи

Исходя из приведенного анализа, представляется целесообразным упростить процесс разработки веб-приложений. С этой целью в данной работе предлагается способ выделения в веб-приложениях элементов, описание связей между ними и моделирование веб-приложения как системы элементов и связей между ними с помощью теории конечных автоматов.

### Разбиение веб-приложения на элементы и связи между элементами

Определим веб-страницу как информацию, которая отображается в одном окне браузера. На сервере она, как уже отмечалось выше, может храниться как статичный HTML-файл или генерироваться динамически различными способами. Веб-сайт – это множество веб-страниц, объединенных семантически (по содержанию) и синтаксически (с помощью ссылок или других механизмов связи). Связи между статичными и динамическими страницами и программным обеспечением приложения могут быть разбиты на следующие категории [1].

1. Статические связи (HTML → HTML) – гиперссылки в статичном HTML-коде. Динамически сгенерированные ссылки, а также динамически генерируемое содержимое или элементы программного обеспечения не входят в данный тип связей.
2. Динамические связи (HTML → ПО). В коде страницы содержатся формы, пользователь заполняет одну из них и отправляет обратно на сервер, где данные формы обрабатываются программным обеспечением.
3. Динамически генерируемый HTML-код (ПО → HTML). HTML-код не хранится на сервере, а создается программным обеспечением сервера, в зависимости от входных воздействий.
4. Зависящий от состояния интерфейс пользователя (ПО + состояние → HTML). В данном случае формируемый HTML-код определяется не только входными воздействиями на компоненты программного обеспечения, но и состоянием сервера, например, временем, информацией о сессии пользователя, его привилегиями и т.п.
5. Прямые переходы (пользователь). Не контролируемые веб-приложением переходы – переписывание URL в адресной строке браузера или использование в нем кнопок «вперед» и «назад».
6. Связи между различными элементами ПО. Данный тип связей включает в себя вызовы между компонентами программного обеспечения веб-приложения.
7. Внешние связи. Программные вызовы к ресурсам, находящимся за пределами веб-сервера приложения.
8. Динамические подключения. Платформы Java и .Net позволяют подключать новые компоненты в веб-приложение прямо во время его работы. В платформе Java, к примеру, для достижения этого используются технологии Java reflection и Java beans.

На рис. 1 приведена классификация связей между элементами веб-приложения.

Связи в веб-приложении можно разделить на внешние (тип 7 из вышеперечисленных) и внутренние (все остальные). Внутренние связи, в свою очередь, делятся на связи реакции пользователя – переходы по ним определяются действиями пользователя, и автономные – переходы по ним определяются программной логикой (типы 3, 4, 6, 8). Связи реакции пользователя делятся на контролируемые связи реакции пользователя (они определены в веб-страницах, типы 1 и 2), и прямые переходы (тип 5).

Рассмотренные связи определяют структуру веб-приложения. Моделирование множества связей, т.е. формализованное описание существующих в приложении связей, способно упростить разработку приложений и их тестирование.

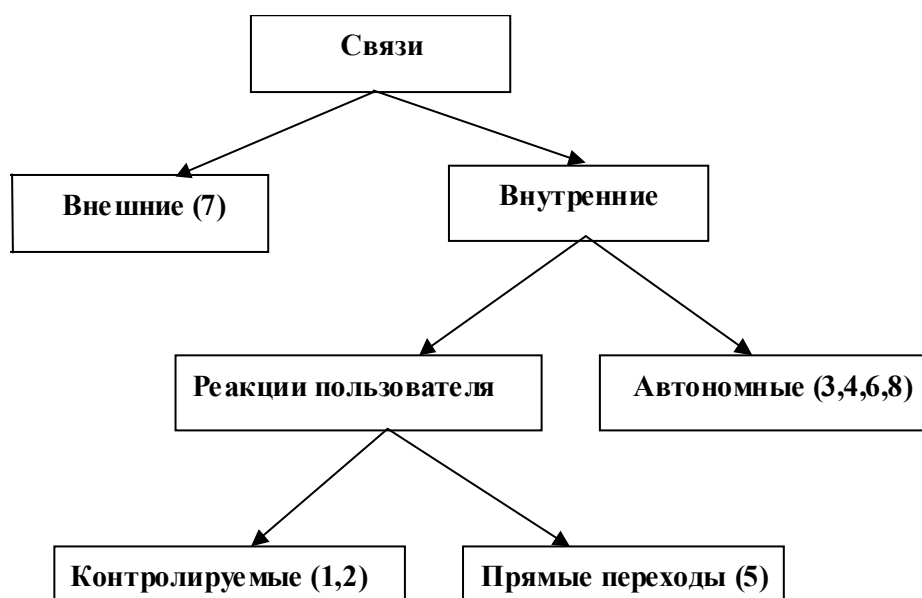


Рис. 1. Классификация связей между элементами веб-приложения

### Пример веб-приложения

Рассмотрим в качестве примера веб-приложения гостевую книгу. Пусть алгоритм ее работы будет следующим:

- на начальном экране этого приложения у пользователя есть два выбора – «Добавить запись» и «Просмотреть книгу»;
- если пользователь выбрал «Добавить запись», то выводится экран ввода новой записи в гостевую книгу (имя пользователя, почтовый адрес, текст сообщения). Пользователь может ввести новое сообщение и отправить его или вернуться в меню;
- в случае выбора пользователем режима просмотра гостевой книги записи извлекаются из базы данных и отображаются на экране. При желании пользователь может ввести новое сообщение.

Таким образом, приложение имеет три экранные формы. Меню первой предлагает пользователю выбор – добавлять ли сразу новую запись в гостевую книгу или просмотреть существующие записи. Вторая предназначена для добавления нового сообщения, в ней есть форма ввода сообщения и данных об отправителе. Также на ней есть две кнопки – «Отправить» и «Вернуться в меню». При нажатии на первую сообщение добавляется в базу данных приложения, при нажатии на вторую происходит возврат в меню. Третья экранная форма предназначена для просмотра уже введенных предварительно в книгу и хранящихся в базе данных приложения сообщений: если при просмотре пользователь решит ввести новое сообщение, он может перейти на экран ввода новой записи, нажав на кнопку «Оставить сообщение».

Конкретная реализация может быть выполнена с использованием скриптового языка PHP и СУБД MySQL и состоять из следующих четырех страниц:

- select.html – в данной странице хранится код разметки экрана начального выбора;
- viewRecords.php – страница просмотра записей гостевой книги. При обращении к этой странице происходит соединение с базой данных, выборка из нее записей и отображение полученных данных в HTML-коде, отсылаемому клиенту;
- insertForm.html – эта страница содержит форму ввода нового сообщения;
- doInsert.php – при обращении к данной странице методом POST передаются данные параметры новой записи гостевой книги. PHP-код страницы соединяется с базой

данных и добавляет в таблицу записей гостевой книги новую запись на основе параметров. Затем происходит перенаправление на страницу viewRecords.php.

Приведенный пример гостевой книги является упрощенной версией реальных приложений гостевых книг. Оно имеет лишь три поля данных, в то время как в реальных приложениях их могут быть десятки [2]. В коде страницы doInsert.php отсутствует проверка вводимых значений на корректность, а профессионально написанное веб-приложение должно иметь такие проверки. Тем не менее, наш пример близок к эксплуатируемым в реальных условиях веб-приложениям и достаточен для иллюстрирования типичных проблем в разработке веб-приложений с помощью популярных сегодня технологий динамических страниц, таких как ASP, JSP, PHP [3]. Более того, взаимодействие гостевой книги с располагающейся на стороне сервера базой данных типично для других подобных приложений, таких как сервер новостей, хранилище статей, фотогалерея.

Рассмотрим связи между страницами согласно приведенной выше классификации и пронумеруем их.

1. Статические связи – select.html → insertForm.html (по нажатию на кнопку «Добавить запись») (C1), select.html → viewRecords.php (по нажатию на кнопку «Просмотреть книгу») (C2), viewRecords.php → insertForm.html (по нажатию на кнопку «Оставить сообщение») (C3), insertForm.html → select.html (по нажатию на кнопку «Вернуться в меню») (C4).
2. Динамические связи – insertForm.html → doInsert.php (отсылка формы после нажатия на кнопку «Отправить») (C5).
3. Динамически генерируемый HTML-код – viewRecords.php → viewRecords.php (C6).
4. Зависящий от состояния интерфейс пользователя (ПО+состояние → HTML) – связей данного типа нет.
5. Прямые переходы – так как никаких ограничений на прямые переходы в коде приложения нет, прямые переходы связывают каждую страницу с каждой.
6. Связи между различными элементами ПО – doInsert.php → viewRecords.php (C7).
7. Внешние связи – связей данного типа нет.
8. Динамические подключения – связей данного типа нет.

Рассмотрим подробнее связь типа 3 viewRecords.php → viewRecords.php (C6). В работе [2] указываются следующие вехи в веб-разработке.

А. Модель статичных страниц (static page model). В первой половине 90-х г.г. все страницы были статическими, т.е. содержали в себе готовый документ в формате HTML (или другом формате представления данных, например, XML). Соответственно, страницы не требовали предварительной обработки и не зависели от аргументов.

Б. CGI-сценарии. Исполняемые на сервере программы используют для вывода результата библиотечные функции записи в стандартный вывод (print для языков C/C++, write для языка Pascal и т.п.). Код представления данных разбросан среди кода программы в аргументах вызовов этих функций.

В. Модель динамических страниц (dynamic page model). Динамическая страница пишется в терминах языков представления данных, а функциональная часть встраивается в код страницы с помощью специальных тегов – скриптлетов.

Г. Модель MVC. Реализация шаблона проектирования «модель–представление–контроллер» (Model–View–Controller) для разделения зависимости кода представления и кода программного обеспечения, работающего с ресурсами сервера.

Наш пример выполнен с помощью модели динамических страниц, поэтому связь вида 3 связывает код работы с базой данных и код представления внутри одной страницы viewRecords.php. При реализации в модели MVC данная связь существовала бы между разными страницами.

## Описание структуры веб-приложений с использованием модели конечных автоматов

Конечный автомат (КА) представляет собой модель дискретного устройства, имеющего внутреннюю память (переменные состояния), а также набор входов и выходов. В общем случае КА может быть задан с помощью набора из пяти элементов  $K=(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$  [4], где  $Q$  – конечное множество состояний автомата;  $q_0$  – начальное состояние автомата ( $q_0 \in Q$ );  $F$  – множество заключительных (или допускающих) состояний, таких, что  $F$  является подмножеством  $Q$  (при достижении одного из этих состояний работа автомата прекращается);  $\Sigma$  – допустимый входной алфавит (конечное множество допустимых входных символов), из которого формируются строки, считываемые автоматом;  $\delta$  – функция переходов автомата.

Автомат начинает работу в состоянии  $q_0$ , считывая по одному символу входной строки. Считанный символ переводит автомат в новое состояние из  $Q$  в соответствии с функцией переходов. Существуют и другие модели для описания конечных автоматов, наиболее наглядным является представление в виде графов переходов (диаграмм состояний).

Веб-приложение является сетью связанных между собой страниц и взаимодействующих с ними элементов ПО. Зададимся целью описать внутренние связи в приложении, при этом будем считать, что у пользователя нет возможности осуществить прямые переходы. Таким образом, рассматриваются связи видов 1, 2, 3, 4, 6 приведенной выше классификации.

Большинство веб-приложений являются диалоговыми [5]. Сначала приложение находится в начальном состоянии. В процессе работы приложение ожидает в текущем состоянии наступления некоторого события, например, запроса пользователя. В зависимости от типа наступившего события приложение переходит в другое состояние. Диалог завершается при достижении финального состояния.

Обозначим состояниями страницы приложения и последовательно вызываемые части ПО, тогда последовательность работы веб-приложения можно описать в терминах конечного автомата. Для приведенного выше примера веб-приложения обозначим страницы приложения состояниями автомата: страницу `select.html` – состоянием  $q_0$ , `insertForm.html` –  $q_1$ , `doInsert.php` –  $q_2$ , `viewRecords.php` –  $q_3$ , а внутренние связи обозначим символами входного алфавита  $C_1$ – $C_7$  соответственно нумерации связей. Связь типа 3 (связывающая исполняемый код и код представления в файле `viewRecords.php`) мы не рассматриваем, соответственно, рассматриваем лишь связи типов 1, 2, 4, 6.

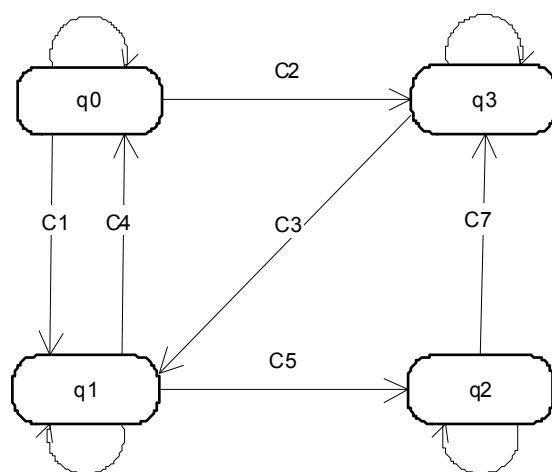


Рис. 2. Граф конечного автомата



Граф полученного автомата приведен на рис. 2. Петли у состояний показывают, что для всех входных сигналов, не указанных явно на графе, происходит возврат в то же самое состояние.

Чтобы учесть связь типа 3 в нашем примере, нужно разделить состояние ViewRecords на два состояния –  $q4$ , при переходе в которое происходит извлечение информации из базы данных, и  $q3$ , при переходе в которое происходит отображение полученных данных. Граф полученного автомата изображен на рис. 3.

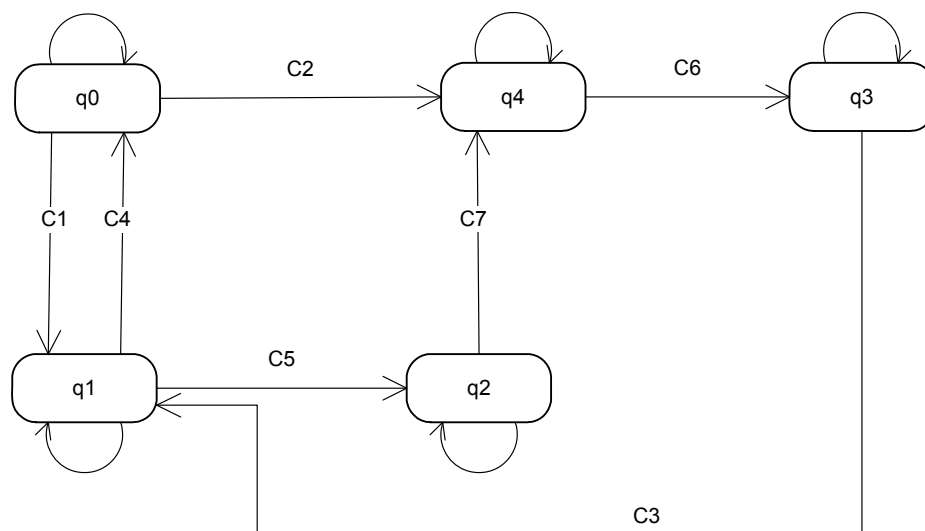


Рис. 3. Граф конечного автомата при разделении состояний

Проведем анализ полученного нами в предыдущем разделе конечного автомата (возьмем второй вариант реализации, граф конечного автомата которого представленный на рис. 3).

Автомат является детерминированным, так как из любого своего состояния по поступлению любого входного символа он может перейти лишь в одно состояние, а не во множество (состояния меняются одно за другим последовательно). Также данный конечный автомат, согласно [6], является автоматом без выходов и может быть описан четверкой  $\langle Q, \Sigma, q_0, \delta \rangle$ , где  $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}$  – множество внутренних состояний автомата,  $\Sigma = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7\}$  – множество входных символов,  $q_0$  – начальное состояние автомата,  $\delta$  – функция переходов. Для рассматриваемого примера она задана в таблице.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
$q_0$	$q_1$	$q_4$	$q_0$	$q_0$	$q_0$	$q_0$	$q_0$
$q_4$	$q_4$	$q_4$	$q_4$	$q_4$	$q_4$	$q_3$	$q_4$
$q_3$	$q_3$	$q_3$	$q_1$	$q_3$	$q_3$	$q_3$	$q_3$
$q_1$	$q_1$	$q_1$	$q_1$	$q_0$	$q_2$	$q_1$	$q_1$
$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_4$

Таблица. Функция переходов конечного автомата

### Заключение

В работе рассмотрена классификация связей между составными частями веб-приложения и их описание с использованием модели конечного автомата. Выделено восемь типов связей между частями веб-приложений, произведена их классификация.

Разработан способ описания модели структуры веб-приложения как детерминированного конечного автомата.

Применение модели конечных автоматов позволяет тестировать веб-приложение без необходимости знания деталей его реализации. Кроме того, при тестировании приложения, описанного в терминах конечного автомата, становится возможным использовать соответствующие методы тестирования, разрабатываемые с конца 1970-х г.г.

### Литература

1. Anneliese Amschler Andrews, Jeff Offutt, Roger T. Alexander. Testing Web Applications by Modeling with FSMs // Software and System Modeling. – 2005. – № 4(3). – P. 326–345.
2. P. Merialdo, P. Atzeni, and G. Mecca. Design and development of data-intensive web sites: The Araneus approach // ACM Transactions on Internet Technology. – 2003. – № 3(1). – P. 49–92.
3. Sergei Kojarski, David H. Lorenz. Domain Driven Web Development With WebJinn // OOPSLA, Anaheim, CA, October 26–30, 2003.
4. Хопкрофт Дж. Э., Мотвани Р., Ульман Дж. Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2002.
5. Konstantin Läufer. Interactive Web Applications Based on Finite State Machines. Invited paper // Proc. Symp. Information Systems Analysis and Synthesis (ISAS), Baden-Baden, Germany, August 1995.
6. Трахтенброт Б.А., Бардзинь Я.М. Конечные автоматы. Поведение и синтез. – М.: Наука, 1970.

*Ожиганов Александр Аркадьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ojiganov@mail.ifmo.ru

*Чепурной Александр Иванович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alexch@bk.ru

УДК 004.627

### СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОТЕРЯМИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ

**А.Ю. Тропченко, Ю.В. Лужков**

В статье излагается суть алгоритма сжатия с помощью выделения локальных областей и рассматривается возможность его применения для сжатия видеопоследовательностей.

**Ключевые слова:** сжатие изображений, адаптивная сегментация, квантование, аппроксимирующая функция, видеопоследовательность, MPEG.

### Введение

Распространение технологий цифрового вещания и цифрового видео привело к необходимости разработки эффективных методов сжатия видеопоследовательностей. Сжатие видео основано на двух важных принципах: пространственной избыточности, присущей каждому кадру видеоряда, и временной избыточности, т.е. похожести предыдущего кадра на следующий. Таким образом, типичный метод сжатия заключается в кодировании первого кадра с помощью некоторого алгоритма сжатия изображений и последующем кодировании разности первого кадра и последующих [1, 4]. Для кодирования первого кадра предлагается использовать алгоритм сжатия с помощью выделения локальных областей. На последующих кадрах производится поиск областей, выде-

ленных на первом кадре, и вычитание их из изображения. Разностное изображение может кодироваться с помощью алгоритма JPEG, либо сохраняется среднее значение яркости фона изображения.

### Описание алгоритма сжатия

Рассматриваемый алгоритм сжатия относится к фрактальным алгоритмам, которые основываются на повторяемости объектов в реальных изображениях. Фрактальные алгоритмы сжимают изображение путем преобразования доменных областей изображения в ранговые области. Ранговая область представляет собой характерный объект изображения, который повторяется в разных видах в домене. Сжатое изображение представляет собой множество ранговых областей и данные о преобразованиях, с помощью которых из каждой ранговой области можно получить доменные области и собрать из них исходное изображение. Изображение можно рассматривать как набор локальных областей (пятен близкой интенсивности), что может быть записано как

$$I(X, Y) \approx \sum_{s=1}^{N_1} f_s(x, y), \quad (1)$$

где  $I(X, Y)$  – исходное изображение;  $f_s(x, y)$  – функция, аппроксимирующая локальную область  $D_s$  с размерами  $l_{xs}$ ,  $l_{ys}$  с центром  $\{x_{0s}; y_{0s}\}$ ;  $s$  – порядковый номер области;  $N_1$  – число областей.

Функция  $f_s$ , которая задает пятно, должна быть гладкой, чтобы избежать разрывов при аппроксимации больших пятен. Применение аппроксимирующей функции позволяет сохранить информацию о пятне в виде координат центра, амплитуды и размеров фрагмента используемой гармонической функции. К аппроксимирующим функциям предъявляются следующие требования:

- простота аналитического описания аппроксимирующей функции;
- наличие выраженного максимума в центре и монотонность убывания к периферии;
- осесимметричность;
- плавное сопряжение с фоновым изображением;
- простота масштабного преобразования.

К числу аппроксимирующих функций, наиболее полно удовлетворяющих указанным требованиям, могут быть отнесены, в частности, двумерные гармонические функции вида [2]

$$f_s(x, y) = \begin{cases} C_s [\cos[\omega_s(x - x_{0s})] + 1][\cos[\omega_s(y - y_{0s})] + 1]; x, y \in D_s, \\ 0; x, y \notin D_s. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим аппроксимацию выделенных локальных областей фрагментами двумерных гармонических функций вида (1). Такая аппроксимация приводит к погрешности (потерям) при построении изображения из функций, аппроксимирующих пятна, но при этом существенно упрощается задача описания пятен. Для этого нужно определить параметры:  $C$  – максимальную амплитуду области;  $x_0$ ,  $y_0$  – координаты центра области;  $l_x$ ,  $l_y$  – размеры области, однозначно определяющие частоты  $\omega_k$ .

Если область имеет эллиптическую форму, то необходимо также определить его ориентацию на изображении. В этом случае при аппроксимации объекта необходимо выполнять дополнительное аффинное преобразование аргументов функции  $f_s$ , соответствующее ее развороту на угол  $\varphi$  в пространстве изображения. Для аппроксимации областей используется следующая функция:

$$F = \frac{\cos(\omega x + 1) \cos(\omega y + 1)}{4}. \quad (3)$$

После выделения на изображении локальных областей и их аппроксимации значение аппроксимирующей функции вычитается из изображения. Вычитание проводится до тех пор, пока в изображении не останется объектов, амплитуда которых превышает некоторый порог, отделяющий фон от объектов.

В данной работе в качестве объектов сжатия рассматриваются полутоновые цветные изображения. При этом перед самым сжатием изображения преобразуются из цветового пространства RGB в пространство YUV [3–5]. После преобразования производится прореживание цветковых плоскостей U и V так, как это делается в алгоритме стандарта JPEG (YUV 4:1:1) [3, 4, 6].

Для каждой из цветковых плоскостей общая схема алгоритма для предлагаемого метода состоит из следующих блоков.

1. Определение точки максимальной яркости (ТМЯ) на исходном изображении.
2. Проверка условия завершения работы алгоритма: если яркость ТМЯ не превышает уровень яркости фона  $I_{background}$ , то завершить процесс сжатия.
3. Определение по алгоритму сегментации всех точек объекта, которому принадлежит ТМЯ.
4. Определение параметров функции  $f_s$  для выбранного объекта ( $C, x_0, y_0, l_x, l_y, \varphi$ ).
5. Вычитание значения функции  $f_s$  из исходного изображения.
6. Переход к п. 1.

Сжатие производится для кадров в пространстве YUV. Алгоритм применяется для каждой плоскости, при этом плоскости могут обрабатываться независимо друг от друга. После кодирования первого кадра видеопоследовательности для каждого следующего кадра выполняются шаги:

1. сжатие первого I-кадра в соответствии с описанным выше алгоритмом;
2. поиск выделенных областей на следующем кадре с учетом компенсации движения;
3. вычитание найденных областей из кадра и сохранение их координат;
4. если найдено менее половины областей, то этот кадр считается началом новой последовательности, переход к п. 1;
5. кодирование полученного разностного изображения;
6. переход к следующему кадру.

Рассмотрим подробнее стадии алгоритма.

## Сжатие первого кадра видеопоследовательности

### Выделение локальных областей

Для выделения области используется алгоритм пороговой сегментации. Суть алгоритма сводится к тому, что все точки, яркость которых находится в заданных пределах, считаются принадлежащими одному объекту. В данной работе на выбор точек накладывается еще несколько ограничений, необходимых для того, чтобы выделенные области были выпуклыми. Это требование обусловлено тем, что выпуклые области наиболее точно аппроксимируются выбранными функциями.

На каждой итерации алгоритма сжатия формируется маска области, которая представляет собой двумерный массив отметок, размер которого равен размеру изображения, и выбираются пороги  $I_{top}$  и  $I_{bottom}$ . Если точка удовлетворяет условиям принадлежности к выделяемой области, то соответствующий элемент массива отметок принимает ненулевое значение.

Сначала производится поиск точки максимальной яркости (ТМЯ) на изображении. Яркость ТМЯ является верхним пределом ( $I_{top}$ ). Нижний предел определяется из соотношения

$$I_{bottom} = I_{top} \times \xi, \quad (4)$$

где  $\xi = 0,25$  для яркостной компоненты (Y-плоскость) и  $\xi = 0,125$  для цветоразностных компонент (плоскости U и V).

Различные значения для разных компонент обусловлены тем, что при выделении областей на плоскостях U и V алгоритм должен обладать большей чувствительностью, чем при выделении областей на плоскости Y. Это связано с тем, что цветоразностные компоненты несут меньше информации, чем Y (что позволяет производить их прореживание без заметного ухудшения качества восстановленного изображения). При этом области на плоскостях U и V не так ярко выражены, как на Y-плоскости (яркость ТМЯ ближе к яркости фона, чем на плоскости Y, т.е. плоскости U и V менее контрастны). Если использовать такое же значение  $\xi$  для этих плоскостей, как и для Y, то при выделении областей будет вноситься существенная ошибка.

Затем осуществляется проверка условия завершения алгоритма сжатия. Яркость ТМЯ сравнивается с яркостью фона  $I_{background}$ . Яркость фона определяется из соотношения

$$I_{background} = I_{max} \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где  $I_{max}$  – максимальное значение яркости в сжимаемом изображении;  $\varepsilon$  – заданный пользователем коэффициент, изменяется в пределах (0,1).

Если яркость ТМЯ не превышает  $I_{background}$ , то процесс сжатия завершается. Коэффициент  $\varepsilon$  позволяет регулировать точность восстановления сжатого изображения. За счет уменьшения этого коэффициента достигается увеличение точности при уменьшении коэффициента сжатия  $K_{сж}$ , т.е. при увеличении размера сжатого файла.

Определение яркости фона относительно самой яркой точки изображения сообщает алгоритму гибкость при работе с изображениями с разной средней яркостью.

ТМЯ также является первой точкой в выделяемой области. Анализ яркости остальных точек изображения происходит в соответствии с алгоритмом заполнения с затравкой. При этом выполняются следующие шаги.

1. Затравочная точка помещается в стек. В данном случае такой точкой будет ТМЯ.
2. Точка извлекается из стека.
3. Проверяются на принадлежность области 8 соседних точек. Точки обходятся по часовой стрелке, как показано на рис. 1. Если точка принадлежит области, то она помещается в стек. Если точка не удовлетворяет условиям принадлежности к области, то она пропускается.



Рис. 1. Схема обхода точек

4. Если стек не пуст, осуществляется переход к п.2. В противном случае выделение области завершается.

Рассмотрим подробнее условия принадлежности области.

1. Любая из соседних точек должна быть отмечена. Выполнение этого условия гарантируется порядком рассмотрения точек в алгоритме заполнения с затравкой.
2. Яркость точки должна удовлетворять условию  $I_{top} \leq I \leq I_{bottom}$ . Если это условие не выполняется, осуществляется переход к следующей точке.

3. Проверяются тройки соседних точек. Если они являются отмеченными, то проверяемая точка отмечается в массиве маски, и осуществляется переход к следующей точке.

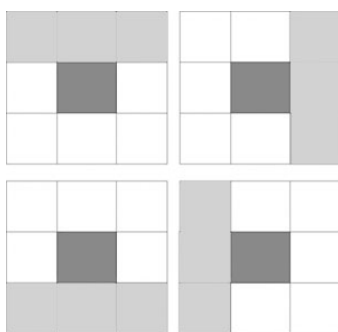


Рис. 2. Проверка троек соседних точек

На рис. 2 темно-серым помечена рассматриваемая точка, а светло-серым – уже отмеченные точки. Если имеет место одна из этих четырех ситуаций, то условие 3 считается выполненным. Это условие служит для ускорения процесса сегментации, так как позволяет быстро добавлять к области точки, которые не нарушат выпуклость области.

4. Линия, проведенная из любой точки границы области к проверяемой точке, не должна пересекать точки, яркость которых не принадлежит диапазону  $[I_{bottom}; I_{top}]$ . При этом данные точки могут быть не отмеченными – предполагается, что они будут присоединены к области на последующих итерациях алгоритма выделения области. Данное условие служит для обеспечения выпуклости выделяемой области.

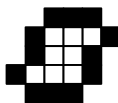


Рис. 3. Добавление новых точек на  $k$ -ом шаге в выделяемую область

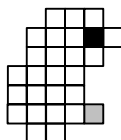


Рис. 4. Исключение точки из области при разметке

На рис. 3 белым отмечены точки, которые были отмечены на предыдущих шагах, а черным – точки, которые могут быть отмечены на  $k$ -ом шаге. На рис. 4 черным помечена точка максимальной яркости, белым – точки, которые были отмечены на предыдущих шагах, и серым – точка, которая не может быть отмечена на текущем ( $k$ -м) шаге. Условия 3 и 4 призваны обеспечить выпуклость выделенной области.

В результате работы алгоритма выделения областей получаем массив, в котором отмечены точки, входящие в выпуклую область. Далее эта область аппроксимируется заданной функцией. В том случае, если выделенная область состоит всего из одной точки, то она не аппроксимируется функцией. Выделенная точка вычитается из изображения. При восстановлении изображения яркость такой точки полагается равной среднему арифметическому 4 соседних точек.

### Определение параметров аппроксимирующей функции

Для аппроксимации выделенной области с помощью гладкой функции находятся параметры функции. Определение параметров происходит в следующем порядке.

1. Определяется центр области  $x_0, y_0$ .

2. Определяется ориентация области  $\varphi$ .
3. Определяются размеры области  $l_x, l_y$ .
4. Определяется амплитуда  $C$ .

Рассмотрим подробнее эти шаги. Для определения центра области  $x_0, y_0$  считаются предварительные размеры  $(l_{x1}, l_{y1})$  области без учета ее ориентации и ее границы  $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ . Координаты центра вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} y_0 &= y_{\min} + \frac{l_{y1}}{2}, \\ x_0 &= x_{\min} + \frac{l_{x1}}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Затем определяется ориентация области  $\varphi$ .

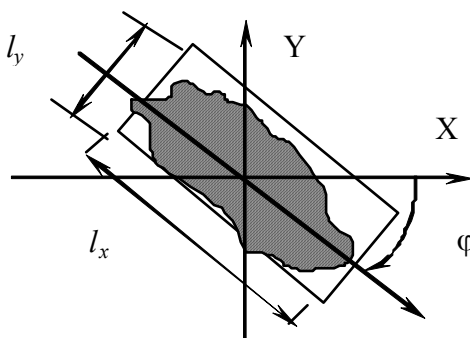


Рис. 5. Определение ориентации локальной области эллиптической формы

Для всех точек области выполняются следующие действия. Для всех направлений  $i = 0, \dots, 7$  выполняется обратное преобразование:

$$\begin{aligned} x &= a_{ci}(x' - x_0) + a_{si}(y' - y_0) \\ y &= -a_{si}(x' - x_0) + a_{ci}(y' - y_0) \end{aligned} \quad (7)$$

Для каждого направления для всех точек определяются  $x_{\min i}, y_{\min i}, x_{\max i}, y_{\max i}$ , т.е. границы прямоугольной области, описывающей объект. Зная количество точек исходного объекта  $Cnt$ , определяем  $K_{\varphi i}$  – коэффициент заполнения прямоугольной области для каждого направления:

$$K_{\varphi i} = \frac{Cnt}{(x_{\max i} - x_{\min i} + 1)(y_{\max i} - y_{\min i} + 1)}. \quad (8)$$

Выбирая  $\max(K_{\varphi i})$ , определяем направление (поворот)  $i$ , размеры  $l_x$  и  $l_y$ :

$$\begin{aligned} l_x &= x_{\max i} - x_{\min i} + 1 \\ l_y &= y_{\max i} - y_{\min i} + 1 \end{aligned} \quad (9)$$

Размеры  $l_x$  и  $l_y$  не должны превышать 255, так как для их хранения используются 2 байта. В случае, если размер выделенной области по любой из координат будет больше 255, то область уменьшается до максимального разрешенного размера.

Новый центр объекта  $(x_0^*, y_0^*)$  для аппроксимирующей функции  $f_s$  определяется соотношениями

$$\begin{aligned} x_0^* &= \frac{(x_{\min i} - x_{\max i})}{2}, \\ y_0^* &= \frac{(y_{\min i} - y_{\max i})}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Выполняя прямое аффинное преобразование над  $(x_0^*, y_0^*)$ , получаем  $(x_0, y_0)$  в пространстве изображения:

$$\begin{aligned}x_0' &= a_{ci}x_0^* - a_{si}y_0^* + x_0, \\y_0' &= a_{si}x_0^* + a_{ci}y_0^* + y_0.\end{aligned}\tag{11}$$

Значения  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  округляются до целых. Таким образом, параметры  $\varphi$ ,  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  функции  $f$  определены. Яркость ТМЯ данной области будет составлять амплитуду  $C$ .

Определенные таким образом параметры аппроксимирующей функции сохраняются. Значения аппроксимирующей функции вычитаются из исходного изображения.

### **Поиск выделенных областей на следующем кадре с учетом компенсации движения**

Следующий шаг алгоритма заключается в поиске выделенных областей на следующем кадре. Для поиска используются области до их аппроксимации. Поиск происходит в окрестности выделенной области (области поиска). Размеры окрестности определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}L_x &= 2 \Delta x, \\L_y &= 2 \Delta y,\end{aligned}\tag{12}$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – ширина и высота прямоугольника, в который вписана выделенная область. При этом центром окрестности будет являться точка с координатами  $(a + \Delta x/2, b + \Delta y/2)$ , где  $a$  и  $b$  – координаты левого верхнего угла прямоугольника, в который вписана область. Для всех возможных положений прямоугольника с выделенной областью внутри области поиска вычисляется разность пикселей, принадлежащих выделенной области, и соответствующих пикселей в области поиска. Положение, при котором средняя разность пикселей (остаточная энергия изображения) минимальна, используется для построения вектора движения области. Пороговое значение остаточной энергии, выше которого области считаются несовпадающими, устанавливается экспериментально.

### **Вычитание найденных областей из кадра и сохранение их координат**

Найденная область вычитается из кадра, при этом сохраняется вектор движения, описывающий перемещение области относительно ее положения на  $I$ -кадре, и идентификатор области.

### **Переход к следующему $I$ -кадру**

Если найдено менее половины областей, то этот кадр считается началом новой последовательности. Следующий кадр рассматривается как новый  $I$ -кадр, т.е. сжимается независимо от предыдущих кадров.

### **Кодирование полученного разностного изображения**

Разностное изображение кодируется в соответствии с алгоритмом jpeg и сохраняется наряду с векторами движения и соответствующими идентификаторами областей  $I$ -кадра. После этого осуществляется переход к следующему кадру.

### **Восстановление видеопоследовательности**

Для первого  $I$ -кадра выделенные области хранятся в явном виде. Они используются для восстановления этого кадра и всех последующих. Последующие сжатые кадры представляют собой набор координат и идентификаторов областей  $I$ -кадра, а также разностное изображение.

Восстановление кадра сводится к вычислению функций  $f(x, y)$  на каждой итерации и алгебраическому суммированию. Вычислительные затраты процедуры восстановления минимальны.



После восстановления плоскостей в них производится поиск одиночных точек с нулевой яркостью. Эти точки в подавляющем большинстве случаев являются результатом отбрасывания одноточечных областей на этапе сжатия. Яркость этих точек рассчитывается как среднее арифметическое 4 соседних точек.

### Заключение

Для кодирования видео предлагается использовать метод, основанный на выделении локальных областей и параметрическом их описании. Выделение областей производится на первом кадре видеопоследовательности (*I*-кадр), затем производится поиск выделенных областей на последующих кадрах.

### Литература

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 384 с.
2. Ожиганов А.А., Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Модифицированный фрактальный метод сжатия многоуровневых изображений // Информационные технологии. – 2003. – № 3.
3. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004 – 368 с.
4. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – М.: Техносфера, 2005. – 368 с.
5. Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC), 2003
6. Image and Video Coding – Emerging Standards and Beyond // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – V. 8. – № 7. – November 1997. – P. 814–837.

*Тропченко Александр Ювенальевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, tau@dl.ifmo.ru

*Лужков Юрий Валерьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр техники и технологий, аспирант, luzhkov@inbox.ru

УДК 681.3

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ САПР P-CAD-2006 НА ОСНОВЕ ОПЫТА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.А. Арустамов, Ю.А. Гатчин, Е.Б. Романова

Приводятся характеристики различных этапов конструкторско-технологического проектирования печатных плат и функциональная взаимосвязь между ними, проводится анализ функциональных возможностей САПР P-CAD-2006 с точки зрения полноты реализации этих этапов, приводятся данные, полученные в ходе проектирования плат различной сложности. Делается вывод о недостаточном функциональном обеспечении полного цикла проектирования, определяются направления совершенствования существующего функционала.

**Ключевые слова:** проектирование печатных плат, размещение, трассировка, пакет проектирования, функциональные возможности.

### Введение

Разработка аппаратуры, в том числе электронной, проводится поэтапно в соответствии с проектными и производственными стадиями работ [1]. Из них, прежде всего,

представляет интерес конструкторская стадия – стадия синтеза внешнего облика, габаритов, компоновки, т.е. стадия постановки задачи производству. Следующая, технологическая стадия отвечает на вопрос, каким образом производство будет решать поставленную задачу. Необходимо помнить, что основную оценку замысла конструктора, как правило, выставляет технолог, и поэтому процесс конструкторско-технологической подготовки (КТПП) неразрывен. Однако организационно конструктор исполняет волю разработчика и требования технического задания, технолог же тяготеет к привязке изделия к возможностям конкретного производства. Последняя из рассматриваемых стадий – производственная – является конечным потребителем конструкторской документации. Важно понимать, что все три стадии постоянно оказывают друг на друга влияние. Они существуют в непрерывной цепи взаимодействия, что практически исключает возможность существенной локальной перестройки.

При разработке электронной аппаратуры важным этапом является проектирование печатных плат (ПП). При проектировании печатных плат в САПР P-CAD-2006 выявляются следующие недостатки, затрудняющие конструкторско-технологическую подготовку производства ПП:

- в двухмерной модели ПП нельзя размещать электронные компоненты (ЭК) на ПП с учетом высот ЭК;
- алгоритмическое размещение во внешней программе увеличивает время проектирования ПП (за счет преобразования данных, изучения программы, разнородности интерфейсов);
- алгоритмическая трассировка во внешней программе значительно увеличивает время проектирования ПП (за счет преобразования данных, изучения программы, разнородности интерфейсов); кроме того, при преобразовании данных в сторонние форматы возникает потеря и изменение данных.
- формирование гербер-слоев и файла сверловки во внешней программе увеличивает время технологической подготовки производства (ТПП) ПП (за счет преобразования данных, изучения программы, разнородности интерфейсов); кроме того, при преобразовании данных возникает их потеря;
- отсутствует программа расчетов, из-за чего все расчеты приходится выполнять вручную или во внешних программах;
- отсутствует программный модуль топологического анализа, который приходится выполнять визуально или в сторонней программе.
- отсутствует возможность изготовления ПП по RP (Rapid Prototyping)-технологии;
- проверка зазоров между контактными площадками и переходными отверстиями в слое шелкографии осуществляется одновременно, но нанесение покрытия на переходные отверстия обычно возможно, для контактных площадок такая возможность отсутствует;
- интерактивная трассировка в САПР P-CAD-2006 осуществляется в координатной сетке, что затрудняет трассировку ПП при наличии посадочных мест с различным шагом – метрическим и дюймовым.

### **Двухмерное проектирование ПП в САПР P-CAD-2006**

При проектировании в P-CAD-2006 топология ПП представляет собой двухмерное изображение. В насыщенных платах приходится устанавливать ЭК друг под другом (компонент поверхностного монтажа можно расположить под выводным компонентом, устанавливаемым на ПП с зазором). При размещении компонентов на двухмерной модели ПП сложно представить размещение двух ЭК друг под другом. В двухмерной модели приходится все время проверять размеры компонентов и возможность такой установки. Невозможна проверка технологических параметров (контроль DRC) для ЭК, ус-

тановленных друг под другом. В двухмерном измерении неудобно проектировать ПП, устанавливаемую в корпус сложной формы (с разными высотами – ступенчатой формы), так как необходим постоянный контроль возможности установки перемещаемых электронных компонентов в корпус.

### **Использование внешних пакетов для КТПП ПП**

При КТПП ПП в САПР P-CAD-2006 некоторые этапы приходится выполнять в сторонних программных модулях, не входящих в пакет программ P-CAD-2006.

Размещение ЭК на ПП на практике осуществляют чаще всего вручную [2]. Для авторазмещения используют программы SPECCTRA, Cluster Placer и Statistical Placer. Программы авторазмещения могут рекомендоваться только как вспомогательный инструмент при интерактивном размещении, когда часть компонентов предварительно размещается вручную и блокируется. Традиционно считается, что автоматическое размещение с помощью большинства программ выполняется некорректно. Однако в большинстве случаев в этом виноваты сами пользователи, которые уделяют недостаточное внимание подготовительному этапу. Чем менее детально пользователь описывает критерии, которые должны использоваться в работе программы расстановки, тем худший будет получен результат.

Для алгоритмической трассировки часто используют пакеты SPECCTRA или Situs. Такое решение оправдано в случае несложных плат, как правило, цифровых устройств и устройств, работающих на невысокой тактовой частоте [3]. Трассировку ПП аналоговых и аналогово-цифровых устройств осуществляют интерактивно (полуавтоматически). Трассировку цепей земли и питания, а также ответственных сигнальных цепей практически всегда необходимо выполнять вручную.

Технологическую подготовку производства (формирование гербер-слоев и файла сверловки) осуществляют, как правило, в пакете CAM350.

Расчеты в ходе проектирования выполняются вручную (на бумаге) или в сторонних программах. Конструкторские расчеты, не зависящие от топологии трасс проводников (ширина проводников, зазоров, шага расстановки ЭК), часто вообще игнорируют. Ширины проводников и зазоров часто используют из стандартного ряда. Например, ширину проводников при изготовлении на российском производстве задают 0,25 мм, ширину проводников питания – 1 мм, зазоры – по 0,25 мм. Шаг расстановки ЭК при ручном размещении не рассчитывают, а определяют визуально («на глаз»). Опытный конструктор достаточно верно определяет шаг расстановки ЭК визуально, но опыт приобретается со временем, а на начальной стадии полезно использовать расчет шага расстановки ЭК. При автоматическом размещении шаг расстановки ЭК рассчитывается программой авторазмещения. Конструкторские расчеты с учетом топологии трасс проводников (на прочность, тепловой расчет) выполняют обычно вручную, хотя не исключено использование внешнего пакета, обеспечивающего такой расчет.

Расчеты на прочность выполняют, как правило, для ПП сложной конструкции с крупными габаритами. В остальных случаях определяют визуально наиболее уязвимые места и усиливают конструкцию ПП привычными методами. Часто усиление жесткости является чрезмерным, что неоправданно увеличивает габариты конструкции, увеличивает расход материалов на изготовление дополнительных деталей и т.д.

Тепловому расчету также иногда не уделяют должного внимания. Как правило, разработчик электрической схемы сообщает конструктору о том, какие ЭК выделяют большое количество тепла, и конструктор, в соответствии с этими указаниями, устанавливает для них радиаторы. Выбор их конструкции и расчет размеров на практике обычно не производят, а выбирают какой-либо типовой, что также неоправданно уве-

личивает габариты конструкции, увеличивает расход материалов на изготовление дополнительных деталей и т.д.

Анализ, учитывающий топологию, также приходится выполнять визуально или с привлечением внешнего пакета. На некоторых ПП допускается выполнение такого анализа визуально. На сложных ПП (с количеством ЭК более 100, в аналогово-цифровых схемах, с различными напряжениями электрических цепей) анализ, учитывающий топологию, разумнее выполнять автоматически во внешнем пакете (например, в Compliance).

Для изготовления прототипа ПП по RP-технологии приходится в сторонней САПР из двумерной модели ПП создавать трехмерную и формировать модель формата STL (от англ. *stereolithography*). RP-технологии – это технологии быстрого прототипирования. Они предоставляют возможность получать физические детали и модели без инструментального их изготовления, путем преобразования данных, поступающих из САД-системы, и получить проекты в трехмерном представлении [4]. Развитие данной технологии направлено на уменьшение скорости прототипирования, стоимости установок и их обслуживания, увеличение точности прототипов.

Создание прототипа по RP-технологии имеет ряд преимуществ:

- прототип модели ПП, в первую очередь, позволяет оценить внешний вид изделия, и не только конструктору, который достаточно четко представляет его (внешний вид) по модели, но и другим лицам, участвующим в разработке и эксплуатации данного изделия (разработчикам схем, заказчикам и др.);
- изготовление прототипа печатной платы позволяет проконтролировать правильность установки электронных компонентов на плате и оценить возможность монтажа ЭК на печатную плату;
- появляются новые возможности оценки монтажа конструкции, эргономических характеристик конструкции, характеристик деталей и сборочных единиц (радиаторы, угольники и т.п.), контроля функциональности, исследования механических свойств объектов, проверки воздушных потоков;
- появляются широкие перспективы по оптимизации конструкции.

Следствием перечисленных факторов является существенное повышение качества выпускаемой продукции.

### **Функциональные возможности САПР P-CAD-2006**

Для проверки выполнения технологических ограничений проекта в САПР P-CAD-2006 используется контроль DRC (Design Rules Check). Утилита проверки DRC имеет опцию «Silk screen violations» – проверка зазоров между контактными площадками или переходными отверстиями в слое шелкографии. Выполнение этого правила необходимо для качественного изготовления ПП, так как в случае попадания краски (графику в слое шелкографии воспроизводят нанесением краски) на КП или переходное отверстие пайка становится невозможной. Следовательно, невозможны установка корпусов на посадочные места и контакт с переходным отверстием. Необходимость подпайки к переходному отверстию может возникнуть при коррекции платы – это бывает на первоначальном этапе проектирования. В платах, изготавливаемых серийно, можно наносить краску на переходные отверстия, так как их конструкция реализует требуемый функционал с выполнением всех ограничений, и коррекции в них не вносятся. Исходя из изложенного, следует разделить опцию «Silk screen violations» при проверке DRC на две: проверка зазоров между КП и объектами в слое шелкографии и проверка зазоров между переходными отверстиями и объектами в слое шелкографии.

Интерактивная трассировка в САПР P-CAD-2006 производится в координатной сетке, что вносит в проектирование ПП ограничения и неудобства, связанные с исполь-

зованием топологических посадочных мест, созданных в разных системах измерения. При прокладке проводников в этом случае приходится часто изменять настройки сетки. В современных системах для интерактивной трассировки используется так называемая электрическая сетка [5]. В электрической сетке задается некоторая окрестность вокруг электрического объекта (конца проводника, контактной площадки, переходного отверстия), попадая в которую, указатель мыши притягивается точно к его центру. Наличие электрической сетки позволяет прокладывать проводники по оптимальному пути из центра одного электрического объекта в центр другого в соответствии с выбранным режимом рисования. При необходимости включается режим сдвига препятствий, при котором мешающий проводник автоматически отодвигается по мере прокладки проводника. Новое положение мешающего проводника определяется правилами проектирования, регламентирующими зазоры, и не привязывается к сетке.

Современные алгоритмические пакеты трассировки используются в качестве вспомогательного инструмента при интерактивной разводке проводников. Автотрассировщик моделирует наблюдение за действиями разработчика: спрямляет и раздвигает проводники, убирает замкнутые петли, «вспахивает» полигоны – создает промежуток (простор) в полигоне для нового проводника с учетом зазоров, заменяет или удаляет переходные отверстия и т.д. Все эти возможности не реализованы в редакторе топологии ПП в САПР P-CAD-2006. На наш взгляд, необходимо оптимизировать инструментарий для интерактивной трассировки – реализовать вышеописанные возможности интерактивной трассировки.

### Результаты эксплуатации САПР P-CAD-2006

В ходе эксплуатации САПР P-CAD-2006 можно выделить три категории сложности ПП, представленные в табл. 1. Результаты применения САПР P-CAD-2006 при КТПП ПП сведены в табл. 2.

Сократить время на КТПП ПП можно за счет:

- выполнения расчетов и топологического анализа во встроенной системе CAE (Computer-Aided Engineering) в соответствии с CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support)-технологией;
- выполнения алгоритмического размещения и трассировки во встроенном программном модуле САПР;
- выполнения КТПП во встроенной системе CAM (Computer-Aided Manufacturing) в соответствии с CALS-технологией;
- формирования STL-модели посредством выполнения одной команды. Это возможно, если при проектировании использовать трехмерную модель ПП и дополнить функциональность САПР ПП функцией экспорта в формат STL.

Сложность ПП	Габариты, мм <sup>2</sup> , не более	Количество ЭК, не более	Количество переходных отверстий, не более	Количество электрических цепей, не более	Количество слоев металлизации
Малая	100×100	200	300	300	2
Средняя	400×300	1500	3000	1500	4
Высокая	600×500	3000	4000	4000	2

Таблица 1. Категории сложности ПП

Сложность ПП	Особенности разработки топологии ПП	Время КТПП ПП, чел/час						
		Расчеты	Размещение	Трассировка	Анализ	ТПП	Формирование STL	Суммарное
Малая	Ручное размещение ЭК на ПП, интерактивная трассировка проводников, визуальный топологический анализ	5	7	20	7	2	7	48
Средняя	Автоматическое и ручное размещение ЭК на ПП, автоматическая и интерактивная трассировка проводников, топологический анализ во внешнем пакете	12	20	40	10	2	7	91
Высокая	Автоматическое и ручное размещение ЭК на ПП, автоматическая и интерактивная трассировка проводников, топологический анализ во внешнем пакете	16	30	60	14	2	7	129

Таблица 2. Результаты применения САПР P-CAD-2006 при КТПП ПП

### Заключение

В ходе функционального анализа САПР P-CAD-2006 были получены статистические данные, характеризующие процесс КТПП ПП различного уровня сложности, и выявлены следующие основные недостатки, приводящие к увеличению срока подготовки:

- ограниченность двумерной модели проектирования;
- использование координатной сетки;
- отсутствие модулей алгоритмического размещения и трассировки, контроля зазоров и формирования файлов сверловки и гербер-слоев, контроля топологии.

Выявленные функциональные недостатки, ограничивающие область применения пакета, позволили сформулировать требования к САПР ПП, в большей степени удовлетворяющей современным потребностям проектирования.

### Литература

1. Семенов И.А. Конструкторско-технологическая подготовка и планирование производства [Электронный ресурс]: Сайт информационных технологий. – Режим доступа: <http://www.inftech.webservis.ru/it/diploms/dip1/c22.html>, своб.
2. Иванова Н.Ю., Романова Е.Б. Информационные технологии проектирования ЭВС: Методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 118 с.
3. Стещенко В.Б. ACCEL EDA. Технология проектирования печатных плат. – М.: Нолидж, 2000. – 512 с.
4. Gatchin Y.A., Romanova E.B., Korobeynikova M.A. RP-technologies in designing the radio-electronic equipment // Proceedings of the International Scientific Conferences «Intelligent Systems (IEEE AIS'04)» and «Intelligent CAD's (CAD-2004)». – 2004. – V.3. – P.127–128.

5. Altium Designer (Protel) – сквозная система проектирования печатных плат [Электронный ресурс]: Сайт компании ООО «ЕвроИнТех». – Режим доступа: <http://www.eurointech.ru/protel>, своб.

- Арустамов Сергей Аркадьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, [sergey.arustamov@gmail.com](mailto:sergey.arustamov@gmail.com)
- Гатчин Юрий Арменакович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, [gatchin@mail.ifmo.ru](mailto:gatchin@mail.ifmo.ru)
- Романова Ева Борисовна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, [eva\\_rom@mail.ru](mailto:eva_rom@mail.ru)

---

## ANALYSIS AND SYNTHESIS METHODS OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES POWER SUBSYSTEMS WITH HIGH POWER PARAMETERS

**P. Borisov, V. Tomasov**

**Keywords:** active voltage rectifier, direct current branch, uncontrollable rectifier, recuperation, spectral method, pulse-width converter, direct current electric drive, power subsystem, power parameters.

Analysis and synthesis methods of electro technical complexes power subsystems with high power parameters are considered at unilateral and bilateral power consumption and depending on type and properties of the primary power supply, character and operating load conditions. The search of project variants is performed during optimization problem decision that allows making the proved choice of a final variant of the power subsystem project.

*Pavel Borisov* – Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D., Associate professor, borisov@ets.ifmo.ru

*Valentine Tomasov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D, Associate professor, Department head, tomasov@ets.ifmo.ru

## ADAPTIVE AIR-TO-FUEL RATIO AND TORQUE CONTROL OF INJECTOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**D. Gerasimov, S. Kolyubin, V. Nikiforov**

**Keywords:** internal combustion engine, adaptive control, adaptation algorithm

An algorithm of adaptive two-channel air-to-fuel ratio and torque control in injector internal combustion engines is proposed in the paper. The proposed control is based on a nonlinear mathematical model of the engine and on special integral adaptation algorithms with high rate of convergence.

*Dmitriy Gerasimov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate student, gerasimovdn@mail.ru

*Sergey Kolyubin* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ksa\_tau@mail.ru

*Vladimir Nikiforov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Pro-rector, D. Sc., professor

## STABILITY ANALYSIS AND SYNTHESIS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS WITH PULSE POWER AMPLIFYING DEVICES

**M. Nikitina, D. Osipov, V. Tolmachov**

**Keywords:** adaptive control system, digital regulator, stability analysis, parametrical synthesis

The article deals with the method of adaptive control system synthesis including digital regulators and multi-module pulse power amplifying device from the stability providing condition of the given turn-down and the specified operation speed of parameters to the power circuit at the specified level of current pulsations in loading and limited commutation frequency of the power keys.

*Mariya Nikitina* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D., Associate professor, nikitina@ets.ifmo.ru

*Dmitriy Osipov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D., Assistant, osipov77@mail.ru

*Valeriy Tolmachov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D., Associate professor, tolmachov@ets.ifmo.ru

## ENERGY CHARACTERISTIC OF DISCRETE WAVELET TRANSFORMS: APPLICATION FOR TRIBOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL SIGNALS

**V. Musalimov, O. Dick, A. Tyurin**

**Keywords:** wavelet transform, spectral energy density, cumulate, action parameters.

The article deals with the problem of nonstationary signals analysis obtained under different experimental conditions. The new estimation method of the spectral energy density parameters of a signal and its details obtained for the discrete wavelet decomposition is suggested. The efficiency of the method is tested for profilograms of the metallic samples surface and kinetic tremor arising while keeping isometric force of the human hand. Action parameters analysis for the profilogram enables us to elucidate the energy structure of the friction surface layers. Analysis of time series of kinetic tremor with action parameters allows distinguishing the difference between healthy patients from a Parkinson tremor.

*Victor Musalimov* – Saint-Peterburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., Professor, musVM@yandex.ru

*Olga Dick* – Saint-Petersburg Pavlov Institute of Physiology, senior staff scientist, glazov.holo@mail.ioffe.ru

*Andrey Tyurin* – Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, master, andrey4t5@rambler.ru



## CHARACTERISTICS OF MULTI-CHANNEL QUEUING SYSTEMS WITH EQUIVALENT THROUGHPUT CAPACITY

V. Sosnin

**Keywords:** queuing theory, multi-channel queuing systems, non-exponential distribution laws, efficiency estimation, simulation

Characteristics of multi-channel queuing systems with non-exponential distribution laws of parameters are analyzed using simulation. The method for choosing optimal channels number is proposed. The influence of input calls flow parameter to the average sojourn time is studied in details.

*Vladimir Sosnin* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate student, vsosnin@mail.ru

## MULTIMASS SYSTEM APPLICATION IN MICROMECHANICAL GYROS FOR INCREASE OF RESISTANCE TO VIBRATION

M. Evstifeev, D. Rozentsvein

**Keywords:** micromechanical gyros, interconnected oscillators, elastic suspension

Multimass system application in micromechanical gyros for increase of resistance to vibration is discussed. Linear and angular oscillators with mechanical and electrical interconnections are analyzed. Requirements for design parameters are derived with due account of resistance for vibratory overload.

*Mikhail Evstifeev* - State Scientific Center of Russian Federation Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR", D. Sc., Head of section, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru

*Dmitriy Rozentsvein* - State Scientific Center of Russian Federation Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR", engineer, Postgraduate student, rosenzwein@mail.ru

## RELIABILITY EVALUATION OF STRUCTURALLY REDUNDANT ITEMS DURING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS ENGINEERING

Yu. Gatchin, O. Kuznetsova, V. Lobov

**Keywords:** reliability, failure-free operation

The article is devoted to the practical experience of reliability (failure-free operation) prediction during engineering of structurally redundant items, ingressed into complex technical systems and based on the devices with incomplete control of failures and restrictions in non-failure operation of control means as well as switching elements from the major device to the redundant one.

*Yuri Gatchin* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., Department Head, Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

*Vadim Lobov* – Federal State Unitary Enterprise Saint-Petersburg Experimental-Design Bureau “Electroavtomatica”, Head of Reliability Section, lobov@online.ru

*Olga Kuznetsova* - Federal State Unitary Enterprise “Saint-Petersburg Experimental-Design Bureau “Electroavtomatica”, Principal Engineer of Reliability Section, kuzola@ya.ru

## MORPHOLOGY AND DYNAMICS OF NANOPHASE

A. Svitenkov, V. Lesnichiy, S. Chivilikhin, V. Gusarov

**Keywords:** micro- nanohydrodynamics, nanophase, micro- nanotube, crystallite, molecular dynamics, fluid

The results of liquid structure simulation by molecular dynamics method in nanorange are described in the present article. Ordered crystal-like fragments in nanophase called crystallites were found as a result of simulation. Their forming features in different conditions are considered.

*Andrey Svitenkov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, svitenkov@yandex.ru

*Vasily Lesnichiy* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, KPNK@yandex.ru

*Sergey Chivilikhin* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, Senior Staff Scientist, Ph.D, chivserg@mail.ru

*Victor Gusarov* – Saint-Petersburg State Electrotechnical University, Corresponding Member of Russian Scientific Academy, D. Sc., VVGusarov@mail.eltech.ru

## MOLECULAR VISUALIZATION IN MAGNETIC-RESONANCE TOMOGRAPHY BY ECHO-PLANAR IMAGING TECHNIQUES

A. Kaznacheeva

**Keywords:** magnetic-resonance tomography, diffusion, functional maps, image quality

Molecular visualizing techniques using magnetic-resonance imaging (MRI) are considered. Echo-planar imaging (EPI) abilities for diffusion measuring and functional maps building were analyzed and image quality affecting factors were estimated. The suggested data acquisition parameters allow increasing accuracy of the diffusion coefficient estimation and functional maps building, the results of the measurement were estimated.

*Anna Kaznacheeva* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, Ph. D, a\_kazn@mail.ru

## **THE INCREASING OF SOLDER JOINTS RELIABILITY UNDER THERMOMECHANICAL STRESS BY MEANS OF UNDERFILLING BALL GRID ARRAY OF BGA PACKAGES**

**V. Geranichev**

**Keywords:** BGA's, reliability, underfill dispensing process, thermal cycle tests

The encapsulation process (underfilling) was examined, that traditionally has been used as a part of Flip Chip assembly process. It is proposed to use underfilling for long-term protection of BGA devices in harsh operating environments. Specific guidelines were defined to ensure stability and quality of the encapsulation of large BGAs. In addition, this paper includes experimental data on thermal cycling for protected and nonprotected BGA samples.

*Vladimir Geranichev* - Federal State Unitary Enterprise "Saint-Petersburg Experimental-Design Bureau "Electroavtomatika", Production Manager, geranichev@mail.ru

## **DISASTER RECOVERY PLANNING FOR BUSINESS PROCESSES INFORMATION AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE**

**S. Arustamov**

**Keywords:** information availability, IT and communication infrastructure, disaster recovery planning, solutions testing and validations.

The article contains presentation of disaster recovery planning for IT and communication infrastructure supporting business processes based on deployment experience in a credit and financial foreign enterprise. Basic steps of development and deployment for IT and communication infrastructure have been analyzed, some recommendations have been generated improving quality of suggested solution, a formal indicator measuring the quality of deployment has been proposed.

*Sergei Arustamov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., professor, sergey.arustamov@gmail.com

## **THREATS AND ANOMALIES DETECTION USING MODERN COMPUTER NETWORK MONITORING TECHNIQUES**

**A. Girik**

**Keywords:** computer network monitoring, traffic analysis and forecasting, threats and anomalies detection, intrusion detection

Modern techniques for telecommunications network traffic analysis and their highs and lows are discussed in the paper. Threats and intrusion detection model is proposed that is based on security indices forecasts and forecasts comparison with normal profile for particular network.

*Alexei Girik* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, tutor, alexei.girik@googlemail.com

## **TRACING CHANGES IN NETWORK TOPOLOGY AND SECURITY PROBLEMS DECISION ON THE BASIS OF THE DATA FLOWS ANALYSIS**

**M. Bud'ko, M. Bud'ko**

**Keywords:** network security, broadcast storm, network topology

Methods for detecting broadcast storms and dynamic network topology exploration using data streams analysis are observed. Technique for detecting network broadcast storm, its source and domain are described. Criteria comparison for searching of similar network traffic patterns is given.

*Michail Bud'ko* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, bmu@mail.ru

*Marina Bud'ko* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, tutor, budkomb@mail.ru

## **INTEGRATION OF DIGITAL WATERMARKS INTO AUDIO SIGNAL USING THE METHOD OF SPECTRUM EXPANSION**

**A. Korobeynikov, A. Dauriskikh, N. Pavlova**

**Keywords:** steganography, audio signal, method, digital watermark, spectrum expansion

This article has a good look at the steganographical method of digital watermark integration into audio signal. It also provides with main steps of practical realization of this algorithm. You can find working structure of the algorithm of coding and decoding messages.

*Anatoliy Korobeynikov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., professor, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

*Alexander Dauriskikh* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate student, sanya219@gmail.com

*Nadezhda Pavlova* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate student, pavlovanv@yahoo.com

## AVAILABILITY ANALYSIS OF MULTILEVEL COMMUNICATION SUBSYSTEM OF COMPUTER SYSTEMS WITH CLUSTER ARCHITECTURE

V. Bogatyryev, S. Bogatyryev

**Keywords:** reliability, availability, failure-resistance, communication subsystem

Standard subsystem reliability of three-level reserved communication system is evaluated. Each switch node is represented as a node, containing basic equipment, which failure causes node crash, and equipment, which failure activates inoperability of the corresponding port.

*Vladimir Bogatyryev* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., bva@tinuviel.ru;

*Stanislav Bogatyryov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate student, realloc@gmail.com

## UPDATE SYSTEM OF SOFTWARE LUCH-2 HARDWARE

A. Klyuchev, E. Petrov

**Keywords:** software update, virtual machine, embedded system, interpreter, load image.

The article is devoted to the problem of software update in the distributed control systems (DCS). The brief review of existent DCS programming facilities is conducted. Programming method, using the concept of aims, uniting DCS resources with similar properties, load images, containing both programmable information and control program, and simple virtual machine LVM, interpreting load images is offered.

*Arkadiy Klyuchev* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Ph. D, kluchev@d1.ifmo.ru

*Evgeniy Petrov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, Post graduate, sshhiicoo@yandex.ru

## CLASSIFICATION OF CONNECTIONS BETWEEN WEB APPLICATION PARTS AND WEB APPLICATION MODELING WITH THE FINITE STATE MACHINES

A. Ozhiganov, A. Chepurnoy

**Keywords:** web application, finite state machines, software development.

This paper describes classification of links between web application elements. Web application example and classification of its links are given. Modeling method for such links with finite state machines is offered. Analysis of finite state machines properties used in this approach is described.

*Alexander Ozhiganov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., professor, ojiganov@mail.ifmo.ru

*Alexander Chepurnoy* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate student, alexch@bk.ru

## LOSSY IMAGE COMPRESSION BASED ON ADAPTIVE SEGMENTATION

A. Tropchenko, Yu. Luzhkov

**Keywords:** image compression, adaptive segmentation, quantization, approximation function, video sequence, MPEG.

The essential of compression algorithm based on detection of local areas is described. Besides, the ability of its application to video sequences compression is discussed.

*Alexander Tropchenko* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., professor, tau@d1.ifmo.ru

*YuriLuzhkov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Post graduate, Master of Technique and Technology, luzhkov@inbox.ru

## P-CAD-2006 PACKAGE FUNCTIONAL ANALYSIS BASED ON USAGE EXPERIENCE

S. Arustamov, Yu. Gatchin, E. Romanova

**Keywords:** printed circuit board design, placement, routing, design package, functional features.

The article contains presentation of engineering and technological phases of printing circuit board design process and functional links between them. Functional analysis of P-CAD-2006 package has been made with the idea to check the complete coverage of these phases. Some data related to the actual cases of design for printed circuit boards of different complexity is brought to reader's attention. Some findings certifying incomplete coverage of all design phases have been generated and directions to enrich the package functionality have been formulated.

*Sergei Arustamov* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., Professor, sergey.arustamov@gmail.com

*Yuri Gatchin* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D. Sc., Department Head, Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

*Eva Romanova* - Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior Tutor, eva\_rom@mail.ru

## Обращение к подписчикам

### Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

«Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание (до 11 выпуска, издание называлось «Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета)»). Издатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО»).

Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска 120 листов.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN: 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

*Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».*

Все публикации в журнале проходят рецензирование ведущих специалистов по научным направлениям.

### *Примерная тематика журнала*

Публикация материалов, отражающих достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптоэлектроника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Журнал может быть полезен для учреждений высшего профессионального образования, научных учреждений и производственных предприятий, а также для отдельных научных работников, студентов, аспирантов и соискателей ученой степени доктора и кандидата наук.

Подписку можно оформить во всех отделениях печати. Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (газеты и журналы).

Главный редактор журнала,  
доктор технических наук, профессор

В.О.Никифоров

Адрес редакции: 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49, E-mail:  
[karmanov@mail.ifmo.ru](mailto:karmanov@mail.ifmo.ru) Сайт журнала <http://books.ifmo.ru/ntv>

# ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

## Общие положения

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В *аннотации*, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во *введении* необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.

В *основном тексте* статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В *заключении* необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

## Предоставляемые материалы

Авторы статьи представляют в редакцию журнала следующие материалы.

1. Оригинал-макет статьи (в 2 экземплярах), содержащий:

- индекс УДК;
- название статьи на русском языке;
- И.О., фамилию авторов (предпочтительно в алфавитном порядке);
- полное название места работы или учебы авторов (для авторов из разных организаций – сведения по каждому автору);
- аннотация статьи на русском языке (до 100 слов);
- ключевые слова;
- текст публикации (с рисунками, таблицами и т.д.);
- список литературы.

2. Экспертное заключение о возможности опубликования.

3. Сведения об авторах (на отдельном листе):

Ф.И.О. – полностью, место работы или учебы (для иногородних – город), должность, ученая степень, звание, e-mail; Для контактного лица дополнительно указываются адрес для переписки, телефон для связи и e-mail.

4. Сведения о публикации, содержащие (на отдельном листе):

- название статьи (на русском языке);
- авторы (на русском языке);
- индекс УДК;
- ключевые слова (на русском языке);
- аннотация (на русском языке);
- литература (на русском языке);
- название статьи (на английском языке);
- авторы (на английском языке);
- ключевые слова (на английском языке);
- аннотация (на английском языке).

5. Диск (CD-R, DVD-R, допускается дискета 3,5 дюйма) с перечисленными выше материалами в электронном виде. Материалы в электронном виде представляются в виде отдельного каталога (название каталога – фамилия и инициалы контактного лица латинскими буквами, образец: IVANOV\_A\_A) отдельными файлами. Кроме перечисленных материалов, в электронном виде отдельными файлами представляются:

- рисунки (в т.ч. графики), выполненные в приложениях Microsoft Office, Microsoft Visio, Corel Draw, Adobe Photoshop, Adobe Illustrator;
- таблицы (в сгруппированном виде).

Текст статьи и сведения об авторах должны быть подписаны каждым автором.

### **Основные требования к оформлению статей**

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал 1, поля сверху – 20 мм, остальные поля – 25 мм. Абзацный отступ – 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полуторной пустой строкой, а от последующего текста – одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста – Times New Roman, прямой; функции – Times New Roman, прямой; переменной – Times New Roman, наклонный; греческих букв – Symbol, прямой; символов – Symbol, прямой; матрицы-вектора – Times New Roman, прямой, полужирный; чисел – Times New Roman, прямой. Размеры: обычный – 12 pt, крупный индекс – 10 pt, мелкий индекс – 8 pt, крупный символ – 16 pt, мелкий символ – 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. Нумерация позиций – согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.