

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

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

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 53

НОЯБРЬ 2010

№ 11

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

*Под редакцией доктора технических наук, профессора Б. В. Соколова*

### СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....   | 5  |
| <b>СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ<br/>К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>  |    |
| Майданович О. В., Охтилев М. Ю., КуССуль Н. Н., Соколов Б. В., Цивирко Е. Г.,<br>Юсупов Р. М. Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффектив-<br>ности информационных технологий и систем..... | 7  |
| Кулешов С. В. Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных.....   | 17 |
| Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю. Автоматизированная система<br>информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном<br>времени состояния ракетно-космической техники.....       | 20 |
| Львов А. С., Фаткиева Р. Р. Использование web-сервисов для установления<br>медицинского диагноза.....  | 24 |
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ<br/>СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ</b>  |    |
| Павлов А. Н., Осипенко С. А. Исследование безопасности сложных технических<br>объектов.....  | 27 |
| Смирнова О. В. Использование геоинформационных технологий при оценке<br>рисков, вызванных катастрофическими явлениями.....   | 32 |
| Десницкий В. А., Котенко И. В. Комбинированная защита программного обеспе-<br>чения от несанкционированных воздействий.....  | 36 |
| Котенко И. В., Коновалов А. М., Шоров А. В. Исследование бот-сетей и<br>механизмов противодействия им на основе имитационного моделирования.....   | 42 |

## **СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОЦЕССОВ**

|   |    |
|---|----|
| <b>Дилоу-Рагиня Э. А. Э., Колпин М. А., Григорьев К. Л., Соколов Б. В.</b> Поли-<br>модельное описание процесса модернизации унаследованной информационной<br>системы на основе сервис-ориентированного подхода ..... | 46 |
| <b>Зеленцов В. А., Цивирко Е. Г., Чукарин А. В.</b> Метод маршрутизации трафика<br>в информационно-коммуникационной гетерогенной сети.....  | 56 |
| <b>Кокорин С. В., Рыжиков Ю. И.</b> Оптимизация параметров сетей массового обслу-<br>живания на основе комбинированного использования аналитических и<br>имитационных моделей.....                                    | 61 |
| <b>Соловьева И. В., Семенов О. И., Соколов Б. В.</b> Постановка задачи коррекции<br>планов работы корпоративной информационной системы с использованием<br>метода позиционной оптимизации .....                       | 67 |
| <b>Панькин А. В.</b> Метод взаимодействия элементов корпоративной информационной<br>системы .....   | 74 |
| <b>Михайлов В. В., Селяков И. С., Соловьева Т. Н.</b> Применение многоагентного<br>подхода для моделирования биоресурсов .....  | 78 |
| <b>SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)</b> .....   | 85 |

## THEMATIC ISSUE

# INTERDISCIPLINARY INVESTIGATIONS OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

*By Edition of B. V. Sokolov, Doctor of Technical Science, Professor*

## CONTENTS

|   |    |
|---|----|
| PREFACE .....   | 5  |
| <b>SYSTEMS ENGINEERING APPROACHES TO ANALYSIS AND SYNTHESIS<br/>OF UP-TO-DATE INFORMATION TECHNOLOGIES</b>  |    |
| <b>Maidanovich O. V., Okhtilev M. Yu., Kussul N. N., Sokolov B. V., Tsivirko E. G.,<br/>Yusupov R. M.</b> Interdisciplinary Approach to Estimation and Analysis of Information<br>Technologies and Systems Efficiency ..... | 7  |
| <b>Kuleshov S. V.</b> Prospective Characteristics of Digital Data Transmission Channel .....  | 17 |
| <b>Kargin V. A., Maidanovich O. V., Okhtilev M. Yu.</b> Automated System for Information<br>Support of Decision Making in Real-Time Control over Space Rocket Technique<br>State .....                                      | 20 |
| <b>Lvov A. S., Fatkueva R. R.</b> Application of Web-Services to Medical Diagnosis .....  | 24 |
| <b>INVESTIGATION ON SAFETY OF COMPLEX OBJECTS AND SYSTEMS</b>   |    |
| <b>Pavlov A. N., Osipenko S. A.</b> Investigation on Safety of Complex Technical Objects .....  | 27 |
| <b>Smirnova O. V.</b> Application of Geoinformation Technologies to Risk Assessment of<br>Disastrous Effects .....  | 32 |
| <b>Desnitsky V. A., Kotenko I. V.</b> Combined Protection of Software From Unauthorized<br>Modifications .....  | 36 |
| <b>Kotenko I. V., Konovalov A. M., Shorov A. V.</b> Investigation of Botnets and Defense<br>Mechanisms on the Base of Simulation Modeling .....   | 42 |
| <b>SYSTEMS MODELING OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND PROCESSES</b>   |    |
| <b>Dilow-Raginya E. A. E., Kolpin M. A., Grigoriev K. L., Sokolov B. V.</b> Polymodel<br>Description of Inherent Information System Modernization Process on the Base of<br>Service-Oriented Approach .....                 | 46 |
| <b>Zelentsov V. A., Tsivirko E. G., Chukarin A. V.</b> Method of Traffic Routing in<br>Information-Communication Heterogeneous Network .....  | 56 |
| <b>Kokorin S. V., Ryzhikov Yu. I.</b> Optimization of Queueing Network Parameters on the<br>Base of Combined Application of Analytical and Simulation Models .....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Solovieva I. V., Semenov O. I., Sokolov B. V.</b> Formulation of the Problem of Plan Operation Correction of Corporative Information System with the Use of Position Optimization Method..... | 67 |
| <b>Pankin A. V.</b> Method of Coordination for Corporative Information System Elements.....  | 74 |
| <b>Mikhailov V. V., Selyakov I. S., Solovieva T. N.</b> Application of Multiagent Approach to Biological Resource Modeling.....  | 78 |
| SUMMARY .....  | 88 |

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В современных условиях на смену индустриальному этапу развития общества пришла новая эволюционная фаза, связанная с повсеместной информатизацией, осуществление которой возможно на основе максимально полного использования имеющихся информационных ресурсов (ИР) и средств их обработки. При этом главным ресурсом ускоренного развития формируемого информационного общества становятся знания, главным механизмом развития – экономика, основанная на знаниях. В этих условиях особую актуальность приобретают вопросы обоснования необходимого уровня инвестиций в информатизацию и автоматизацию процессов производства товаров и услуг в различных предметных областях, а также вопросы оценивания и анализа эффективности внедрения и использования информационных технологий (ИТ). Бизнес-структуры и государство готовы оплачивать ровно столько ИР, сколько необходимо для информационной поддержки управленческой деятельности. Лишние ИР и избыточные ИТ — это замороженные инвестиции и ресурсы. Недостаточные ИР — это упущенная выгода. Ответы на все перечисленные вопросы составляют основное содержание статей, представленных в настоящем выпуске, большинство авторов которого являются сотрудниками Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН) — ведущего научного учреждения Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН в Северо-Западном регионе.

Статьи, представленные в данном номере журнала, сгруппированы в три тематических направления:

- системотехнические подходы к анализу и синтезу современных информационных технологий;
- исследование проблем безопасности сложных объектов и процессов;
- системное моделирование информационных технологий и процессов.

*Заместитель директора СПИИРАН по научной работе  
доктор технических наук, профессор  
Б. В. СОКОЛОВ*

## PREFACE

Today the industrial phase of progress of society gave way to a new evolutionary phase related to universal informatization necessitating maximal complete employment of existing information resources (IR) and means for information processing. At this stage, knowledge becomes the principle resource of accelerated development of information society, and economics, based on corresponding knowledge, — the main mechanism of the progress. In this situation, problems of feasibility analysis of necessary volume of investment into informatization and automation of manufacturing process in various fields, as well as assessment and analysis of effectiveness of information technologies (IT) implementation, take on great significance. Business structures and the state are ready to pay for information resources necessary for information support of management activity. Redundant IR and excess IT mean frozen assets and supplies of the capital. Insufficient IR signify a loss of profit. Responses to the above challenges constitute the content of papers included in this issue; most of the authors are research workers of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), the leading scientific institution of Department of Nanotechnologies and Information Technologies of RAS in the Northwest Region.

Papers presented in the issue are grouped together into three topics:

- systems engineering approaches to analysis and synthesis of up-to-date information technologies;
- investigation of safety of complex objects and systems;
- systems modeling of information technologies and processes.

*Deputy Director for R&D, SPIIRAS  
Doctor of Technical Science, Professor  
B. V. SOKOLOV*

---

---

# СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

---

УДК. 519.8

О. В. МАЙДАНОВИЧ, М. Ю. ОХТИЛЕВ, Н. Н. КУССУЛЬ,  
Б. В. СОКОЛОВ, Е. Г. ЦИВИРКО, Р. М. ЮСУПОВ

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ И АНАЛИЗУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

Рассматриваются основные факторы и примеры оценивания влияния современных информационных технологий и систем на функционирование существующих и перспективных организационно-технических комплексов. Предлагаются новые методические подходы к решению задач анализа и синтеза эффективных информационных технологий и систем.

*Ключевые слова:* автоматизированные и информационные системы, многокритериальное оценивание и анализ эффективности, сложные организационно-технические комплексы.

**Введение.** Современный этап развития научно-технической революции охватывает все новые и новые сферы человеческой деятельности. Благодаря передовым компьютерным и телекоммуникационным технологиям значительно повышаются эффективность производства, сокращаются расходы всех видов ресурсов и сырья, а также временные затраты. На рубеже XX и XXI вв. начался переход от индустриального к информационному обществу во многих ведущих мировых державах. Информатизация и информационное общество — как конечная цель информатизации — характеризуются активной разработкой и широким, массовым внедрением информационных технологий во все сферы человеческой деятельности [1—10]: социальную сферу, сферу материального производства, энергетику, здравоохранение, образование, науку, культуру, торговлю, транспорт, связь, военное дело и т.д. К настоящему времени сделаны определенные попытки оценить роль и влияние информационных технологий на развитие ряда указанных сфер. В настоящей статье авторы обращаются к анализу влияния информационных технологий и соответствующих информационных систем (ИТ и ИС) на развитие такой сферы, как процессы и системы управления объектами различной природы.

Управление в широком понимании — это функция, присущая организованным системам (техническим, биологическим, социальным и их производным — социально-техническим, человекомашинным и т.д.) и направленная на достижение заданной цели применительно к некоторой предметной области. В этой связи известный английский кибернетик Стаффорд Бир писал, что „управление есть неотъемлемое свойство любой системы“ [11].

Зависимость эффективности функционирования систем управления от уровня развития информатики и информационных технологий очевидна, но в ряде случаев не однозначна [12—14]. Конструктивное выявление и исследование указанной зависимости представляет

собой актуальную научно-техническую проблему, в рамках которой необходимо получить ответ на следующий вопрос — в какие перспективные информационные технологии следует вкладывать деньги и почему.

**Методические основы и примеры оценивания эффективности информационных технологий и систем.** Говоря о современных процессах и системах управления, будем выделять *два класса систем: автоматические и автоматизированные системы управления (АСУ) объектами* (группами объектов). Необходимо отметить, что определяющую роль в таких системах управления играют ИТ, реализованные с использованием соответствующих аппаратно-программных средств и ЭВМ. При этом исторически интеграция данных технологий и средств с системами автоматического регулирования/управления (САР/САУ) проявлялась даже в том, что в первые годы существования ЭВМ их называли кибернетическими машинами [7]. В отличие от САР/САУ, где в качестве объектов управления рассматриваются относительно простые технические средства, для сложных объектов и комплексов, таких, например, как промышленное предприятие, ракетно-космический комплекс или атомная электростанция, при создании соответствующих систем управления невозможно исключить человеческий фактор. Указанные особенности обусловили создание АСУ, под которыми понимаются системы „человек—машина“, обеспечивающие эффективное функционирование объектов. В таких системах сбор и обработка информации, необходимой для реализации функций управления, осуществляется с применением средств автоматизации и вычислительной техники [4, 5, 7]. В зависимости от функций управления, типов объектов управления, используемых информационных технологий и средств принята следующая классификация АСУ сложными объектами (СО): АСУ технологическими процессами (АСУ ТП); АСУ производственными процессами (АСУ ПП); АСУ гибкими производственными системами (АСУ ГПС); системы автоматизации проектирования (САПР); автоматизированные системы, обеспечивающие проведение научных исследований (АСНИ); автоматизированные системы организационного управления (АСОУ); отраслевые АСУ (ОАСУ); АСУ объединением (АСУО); АСУ предприятием (АСУП); информационно-поисковые системы (ИПС); информационно-управляющие системы (ИУС); интегрированные АСУП (ИАСУП).

Проведенные исследования показали, что наиболее широкое распространение как в России, так и за рубежом перечисленные автоматизированные системы получили на предприятиях, производящих различные виды продукции [4, 5, 7—10, 15—19]. Как правило, в состав таких АСУ входят следующие: АСУ ТП (SCADA), АСУ ПП (MES), АСУП (ERP); при объединении перечисленных систем образуются ИАСУП (СІМ). (В скобках при перечислении отечественных автоматизированных систем приведены сокращенные названия аналогичных зарубежных систем.)

На рис. 1 в обобщенном виде представлены этапы эволюционного развития автоматизированных и информационных систем [8].

В современных условиях вследствие насыщения мирового рынка различными видами продукции, а также всеобщей доступности высоких технологий (в том числе, и в информационной сфере) на первый план конкурентной борьбы выдвигаются *такие факторы, как время и эффективность использования ИТ и ИС*. В этой конкурентной борьбе выигрывает тот, кто сможет в реальном масштабе времени обеспечить:

- успешную синхронизацию бизнес-процессов и производства (системы ERP, MES, АСУ ТП);
- быструю разработку и внедрение на рынке нового продукта (САПР, системы CAD/CAM/PDM);
- внедрение гибкой, эффективной и высокоавтоматизированной технологии управления логистическими процессами, позволяющей сократить циклы поставок и продаж (SCM);
- сокращение времени обработки заказов (CRM);

- контроль расходов ресурсов;
- оперативное управление и диспетчеризацию производства (автоматизированные системы оперативного диспетчерского управления — АСОДУ);
- сокращение времени возврата инвестиций (ROI systems);
- сокращение времени анализа и принятия решений (OLAP системы);
- эффективное управление производственной кооперацией (e-manufacturing, co-manufacturing, m-business) [1—10, 16—19].



Рис. 1

На рис. 2 в обобщенном виде представлены [3] перспективные информационно-коммуникационные технологии, которые оказывают и в ближайшей обозримой перспективе будут оказывать влияние на различные сферы жизнедеятельности, в том числе, и на интегрированные АСУ сложными организационно-техническими комплексами (ИАСУ СОТК).

Для иллюстрации того, какое влияние оказывают указанные технологии на эффективность функционирования СОТК, приведем два конкретных примера.

**Пример 1.** Здесь речь пойдет о космических информационных технологиях, обеспечивающих сбор, хранение, передачу (прием), представление, обработку и анализ данных на различных этапах жизненного цикла космических средств (КС).

В современных АСУ КС данные технологии позволили [15, 20—23]:

- увеличить доступность КС и непрерывность управления ими на основе создания сетевых структур информационного обмена с космическими аппаратами (КА) различных классов;
- внедрить методы ситуационной пакетной телеметрии, позволяющие формировать гибкие программы телеизмерений непосредственно на борту КА;
- существенно сократить объем измерений текущих навигационных параметров, проводимых средствами наземного комплекса управления, на основе всестороннего использования навигационного и частотно-временного поля, создаваемого как отечественной навигационной космической системой „ГЛОНАСС“, так и зарубежными системами;

— обеспечить создание новых поколений КС (модернизировать существующие КС) в целях повышения уровня их стандартизации и многофункциональности, что гарантирует необходимые условия для адаптации и самоорганизации процессов автоматизированного (автоматического) управления КС при динамично изменяющейся обстановке;

— обеспечить децентрализацию (пространственно-временную распределенность) процессов сбора, обработки и представления данных, принятия решений, хранения и доступа к информации на основе создания интегрированных распределенных баз данных и знаний при необходимом уровне информационной безопасности.



Рис. 2

В современных условиях космические ИТ оказывают существенное влияние на все сферы человеческой деятельности — от вопросов управления применением современных видов вооружения до оказания телемедицинской помощи населению. При этом принято оценивать эффективность космических ИТ как по собственным (внутренним) показателям, так и по несобственным (внешним) [5, 7, 10, 20, 22—24].

В целом, применительно к различным системам автоматического и автоматизированного управления при использовании интегрированной информации, получаемой от КС навигации, связи и мониторинга, снижается потребность в дополнительных ресурсах, повышается оперативность, глобальность, точность и надежность привязки потребителей к местности, повышается устойчивость телекоммуникационных систем и эффективность процессов управления [20].

Говоря о собственных показателях эффективности космических ИТ, обратимся к результатам совместных исследований, выполненных СПИИРАН и ЗАО „СКБ ОРИОН“ (Санкт-Петербург) в 2003—2008 гг. [15]. В ходе проведенных комплексных исследований были разработаны и реализованы методологические и методические основы решения задач структурно-функционального синтеза интеллектуальных информационных технологий и

систем мониторинга многоструктурных макросостояний сложных технических объектов, базирующиеся на полимодельном многокритериальном описании, полученном в рамках теории недоопределенных вычислений и управления структурной динамикой [15, 22, 23]. Предварительный анализ показал, что внедрение разработанной интеллектуальной информационной технологии мониторинга состояния (МС) космических средств позволяет получить для систем информационного обеспечения АСУ КС следующий эффект [15]:

- сократить затраты временных ресурсов на проведение мониторинга, обеспечив получение результатов в реальном масштабе времени поступления информации с достаточным уровнем их достоверности;

- повысить гибкость, надежность и информационную емкость используемых при мониторинге состояния программных средств;

- формализовать с помощью языка представления знаний и соответствующей системы подготовки исходных данных и знаний до 90—95 % данных о проведении мониторинга;

- сократить, по крайней мере в два раза, время подготовки исходных данных и знаний для мониторинга состояния КС, вводимых в эксплуатацию;

- сократить в два раза и более время проектирования исполнительной информационной системы МС в реальном масштабе для существующих КС;

- сократить в 10—15 раз длительность цикла разработки и внедрения информационной системы МС;

- обеспечить экономию средств, затрачиваемых на разработку специального программного обеспечения АСУ КС, в состав которой входит система МС;

- исключить до 60—80 % ошибок, возникающих при разработке программ МС, за счет использования средств верификации программного обеспечения;

- сократить общее число искаженных значений измеряемых параметров на 20 %.

**Пример 2.** Другим примером, иллюстрирующим влияние информационных технологий и информатизации на системы управления, является мегаполис и органы его исполнительной власти [1, 10, 25, 26]. Как показали исследования, в условиях модернизации системы государственного управления и одновременного усиления влияния мирового экономического кризиса на социально-экономическую обстановку в стране необходима системная поддержка принятия решений на всех уровнях государственного управления, организация проектного управления по основным направлениям социально-экономического развития страны.

Приоритетными направлениями государственной политики на ближайшие годы в сфере развития информационной и телекоммуникационной инфраструктуры Санкт-Петербурга и рынка услуг связи являются [25, 26]: обеспечение прозрачности работы органов власти и доступа широких слоев населения к телекоммуникационной инфраструктуре и информационным ресурсам (включая доступ к службам спасения и справочным службам); опережающее развитие инфраструктуры связи по отношению к темпам развития экономики в целом; повышение инвестиционной привлекательности отрасли связи и информатизации; создание условий для ускоренного развития новых технологий; обеспечение информационной безопасности; создание условий для развития бизнеса при наличии добросовестной конкуренции; поддержка отечественного производителя оборудования связи, вычислительной техники и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).

На практике в государственном управлении информация о происходящих процессах с нижних уровней системы управления поступает в форме статистической и административной отчетности. При возникновении потребности в оценке текущего состояния в какой-либо области социально-экономических отношений необходимо оформить письменный или устный запрос в соответствующий орган государственной власти. Оценки, полученные на основе таких отчетов, всегда отстают от действительности, а система контроля, построенная таким образом, носит эпизодический и дискретный характер [26].

При этом существующие информационные системы обеспечивают сбор, накопление, функциональную обработку и выдачу информации для поддержки принятия решений и контроля за ходом ведомственных административно-управленческих процессов. Государственные информационные ресурсы (ГИР) оказались фактически разделены по сферам деятельности органов государственной власти. В связи с этим одной из важнейших задач оптимизации информационных потоков становится интеграция в рамках развиваемой в настоящее время государственной автоматизированной системы (ГАС) „Управление“ совокупности разрозненных ГИР федеральных органов исполнительной власти и органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

В рамках создания ГАС „Управление“ используется единая инфраструктура обеспечения юридически значимого информационного взаимодействия. Интеграция ведомственных автоматизированных информационных систем позволяет обеспечить оперативный сбор актуальных ведомственных и территориальных данных. Региональный уровень ГАС „Управление“ в Санкт-Петербурге реализуется на базе функционирующей интегрированной системы информационно-аналитического обеспечения деятельности исполнительных органов государственной власти (ИОГВ) На рис. 3 в обобщенном виде представлены сведения о значениях показателей эффективности внедрения и использования современных ИТ органами исполнительной власти [26].



Рис. 3

**Обсуждение результатов.** По результатам ранее выполненных исследований в рассматриваемой предметной области можно констатировать [10, 15, 20, 23, 24], что задачи оценивания и анализа эффективности внедрения и использования ИТ и ИС имеют комплексный характер и требуют для своего решения использования междисциплинарного подхода к описанию рассматриваемых объектов, технологий и процессов. Такой подход должен базироваться на интегративном использовании фундаментальных и прикладных научных и практических результатов, полученных к настоящему времени в современной информатике, кибернетике и общей теории систем. При этом центральными проблемами при постановке и

решении названных задач применительно к различным классам и видам ИАСУ СОТК, как и в целом для задач оптимизации их характеристик и структур, являются проблемы полимодельного (многомодельного) описания соответствующих объектов и комплексов, а также проблемы многокритериального структурно-функционального синтеза характеристик как самих ИТ и ИС, так и бизнес-процессов и систем, которые они поддерживают. При этом среди возможных постановок задач полимодельного многокритериального исследования эффективности ИТ и ИС можно выделить три, которые являются в настоящее время наиболее перспективными [22, 24].

*Задача I.* Постановка и решение задачи однокритериальной оптимизации показателя эффективности (ПЭ) ИТ и ИС на аналитической модели большой размерности как задачи синтеза указанных технологий и систем. При этом синтез осуществляется путем формальной декомпозиции и проведения оптимизации всех ПЭ с использованием того или иного правила согласования, обеспечивающего сходимость процесса оптимизации к решению исходной задачи. В работах [10, 15, 21—23] описаны методы и алгоритмы решения указанного класса задач.

*Задача II.* Постановка задачи однокритериальной оптимизации ПЭ на имитационной модели ИТ и ИС большой размерности как задачи выбора. Выбор осуществляется путем неформальной декомпозиции задачи, построения совокупности аналитических моделей, отражающих различные стороны функционирования системы и имеющих приемлемую размерность, согласования аналитических моделей по принципу Парето и проведения имитационных экспериментов с паретовскими альтернативами в целях поиска точки, доставляющей экстремум исходному показателю эффективности системы.

Таким образом, в основу данной постановки задачи положена гипотеза о том, что экстремум по исходному (глобальному несобственному) показателю эффективности достигается в одной из точек множества Парето, определяемых при оптимизации по собственным ПЭ, выявленным в результате неформальной декомпозиции. В частности, данная гипотеза выполняется во всех случаях, когда имеет место такая монотонная зависимость, при которой значения несобственного ПЭ не убывают, если не убывают значения собственных ПЭ. Свойство монотонности при задании всех функций в аналитическом виде может быть установлено в результате соответствующего аналитического исследования. Однако на практике несобственный ПЭ не всегда может быть представлен через собственные ПЭ в аналитическом виде и его значения могут быть определены лишь посредством имитационных экспериментов. В этих случаях монотонность может быть установлена на основе определенных „физических свойств“ моделируемой системы [15, 24].

*Задача III.* Постановка задачи многокритериальной оптимизации ПЭ на комплексе моделей как задачи выбора с многими отношениями предпочтения. Выбор осуществляется путем задания множества Парето с помощью основополагающей многокритериальной модели, сужения этого множества на основе интерактивного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе процедуры, выполняемой совместно, с использованием компьютера, лицом, принимающим решения, и лицом, обосновывающим решения. Кроме того, должны быть привлечены дополнительные математические модели, обеспечивающие последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения. Паретовский принцип согласования создает наиболее благоприятные возможности для принятия всесторонне обоснованных решений, основывающихся на анализе изменения различных показателей эффективности внутри этого множества. При этом важное значение имеет правильная разработка стратегии сужения множества Парето с привлечением компетентных специалистов и математических моделей: аналитических и имитационных.

К настоящему времени разработан комбинированный подход (принципы, модели, методы, алгоритмы и методики) к постановке и решению задач многокритериального оценивания,

анализа и выбора эффективных информационных технологий и систем. Этот подход, базирующийся на разрабатываемой авторами теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических комплексов, был апробирован на практике при создании интеллектуальных информационных технологий и систем для критических приложений (космонавтика, атомная энергетика) [15].

Такой подход используется, в частности, при создании информационных систем рационального планирования космической съемки с учетом потребностей различных министерств и ведомств. Задача оптимизации распределения информационного ресурса в этом случае сводится к задаче многокритериальной оптимизации. При этом в зависимости от технических характеристик специальной бортовой аппаратуры КА (работающей в инфракрасном, рентгеновском, видеодиапазонах и т.п.) данная задача приобретает свои особенности. Так, например, для КА, обеспечивающих мониторинг поверхности Земли и имеющих бортовую аппаратуру с низкой и средней разрешающей способностью, показатели эффективности их функционирования зависят от одной переменной — времени. А для КА, имеющих высокую степень разрешающей способности бортовой аппаратуры, эти показатели зависят не только от времени, но и от географических координат объектов, участвующих в космическом мониторинге. Поэтому при планировании работы указанной бортовой аппаратуры приходится учитывать, с одной стороны, большое количество пространственно-временных технических и технологических ограничений, а с другой — субъективную информацию, связанную с предпочтениями заказчиков космической съемки и органов, обеспечивающих функционирование космических аппаратов.

Разработанный авторами комбинированный подход позволил при решении задач космического мониторинга учесть также многочисленные факторы неопределенности, имеющие как объективную, так и субъективную природу. Для этого был привлечен математический аппарат современной теории нечетких множеств, иммуно- и нейрокомпьютинга [15, 20]. Кроме того, учет динамики обстановки, складывающейся при проведении космического мониторинга, конструктивно осуществлялся на основе широкого использования методов параметрической и структурной адаптации созданного модельно-алгоритмического обеспечения процессов оперативного планирования работы как бортовых, так и наземных космических средств [20—23].

**Заключение.** В целом, подводя итог сказанному, следует, в первую очередь, отметить, что одна из основных тенденций развития информационных технологий и систем в XXI в., по мнению авторов, будет связана с решением проблемы всесторонней интеграции данных технологий и систем с существующими и будущими производственными и социально-экономическими структурами и соответствующими системами управления. Для успешного решения этой междисциплинарной проблемы, в свою очередь, необходимо решить целый ряд научно-методологических и прикладных проблем.

Одной из таких наиболее актуальных и интересных научно-методологических проблем, связанных с оценением влияния ИТ и ИС на соответствующие системы управления, является проблема обоснования состава, структуры, количественных и качественных характеристик информации, необходимой для эффективного управления как самими бизнес-приложениями, так и информационными системами, обеспечивающими успешную реализацию бизнес-процессов.

В этой связи в числе первоочередных задач, требующих решения, можно назвать следующие [2]:

— формирование и обоснование системы показателей меры информации, необходимой для эффективного функционирования с адаптивными ИАСУ (для различных классов потребителей и приложений);

- разработка и обоснование методов и алгоритмов определения значений показателей меры информации;
- разработка и обоснование структуры системы регулярного „измерения“ информации;
- разработка и обоснование методов анализа и синтеза адаптивных технологий организации и реализации процессов генерирования, регистрации, сбора, передачи, накопления, хранения, поиска, обработки и выдачи информации конечным пользователям с учетом объективных потребностей в информации и объективных предпосылок реализации перечисленных процессов;
- разработка и обоснование моделей, методов и алгоритмов адаптивного управления качеством информации.

Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-07-00066, 10-07-00311, 08-08-00403, 09-07-11004, 10-08-90027-Бел\_а) и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О-2.3/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вершинская О. А.* Информационно-коммуникационные технологии и общество. М.: Наука, 2007. С. 203.
2. *Герасименко В. А.* Информатика и интеграция в технике, науке и познании // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 5. С. 22—42.
3. *Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С.* Тенденции развития современных информационных технологий с учетом концепции сетцентрических войн // Системы и средства информатики. 2007. Вып. 17. С. 47—64.
4. *Леньшиков В. Н., Куминов В. В.* Производственные исполнительные системы (MES) — путь к эффективному предприятию // Мир компьютерной автоматизации. 2002. №1—2. С. 53—59.
5. *Мертенс П.* Интегрированная обработка информации. Операционные системы в промышленности: Учебник / Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 2007. 424 с.
6. *Перминов С. Б.* Информационные технологии как фактор экономического роста. М.: Наука, 2007. С. 195.
7. Теоретические основы автоматизированного управления: Учеб. для вузов / *Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовский.* М.: Высш. школа, 2006. 463 с.
8. *Черняк Л.* Адаптируемость и адаптивность // Открытые системы. 2004. № 9. С. 30—35.
9. *Черняк Л.* От адаптивной инфраструктуры к адаптивному предприятию // Там же. 2003. № 10. С. 32—39.
10. *Юсупов Р. М., Заболотский В. П.* Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. СПб: Наука, 2009. 542 с.
11. *Бир С.* Кибернетика и управление производством. М.: Фитзматлит, 1963. С. 22.
12. *Strassmann P. A.* The bussiness value of computers // New Canaan: Information Economic Press. 2009.
13. Электронный ресурс: <[www.strassmann.com/pubs/cik/cik-value.shtml](http://www.strassmann.com/pubs/cik/cik-value.shtml)>.
14. Электронный ресурс: <<http://multilink.ru/news/2/22076/print.html>>.
15. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
16. *Wong H., Sycara K.* A taxonomy of middle agents for the Internet // Proc. of the 4th Intern. Conf. Multiagent Systems. IEEE CS Press. 2000.
17. HP Utility Data Center. Technical White paper, 2001. Oct.
18. HP Virtualization. Computing without Boundaries or Constraints. Enabling an Adaptive Enterprise. 2003.
19. IBM. Autonomic Computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology. 2004.
20. Военно-космическая деятельность России — истоки, состояние, перспективы // Тр. науч.-практ. конф. СПб: Изд-во „Левша. Санкт-Петербург“, 2005. 122 с.

21. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельное описание процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
22. Соколов Б. В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. М.: МО РФ, 1992. 232 с.
23. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. № 5. С. 24—41.
24. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники. М.: МО СССР, 1990. 522 с.
25. Электронный ресурс: <<http://gov.spb.ru/>>.
26. Электронный ресурс: <[http://www.gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/c\\_information](http://www.gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/c_information)>.

**Сведения об авторах**

- Олег Владимирович Майданович** — канд. техн. наук, доцент; Космодром „Плесецк“, г. Мирный; начальник космодрома; E-mail: sid.sn@yandex.ru
- Михаил Юрьевич Охтилев** — д-р техн. наук, профессор; ЗАО „СКБ ОРИОН“, Санкт-Петербург; зам. генерального конструктора; E-mail: oxt@mail.ru
- Наталья Николаевна Куссуль** — д-р техн. наук, профессор; Институт космических исследований НАН Украины, Киев; зам. директора
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научным вопросам; E-mail: sokol@iiias.spb.su
- Евгений Геннадьевич Цивирко** — канд. техн. наук; Правительство Санкт-Петербурга, Председатель Комитета по информатизации и связи; E-mail: kis@gov.spb.ru
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; директор; E-mail: yusupov@iiias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

С. В. КУЛЕШОВ

## ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Приведена классификация цифровых каналов связи, рассмотрена структура унарного цифрового канала, выведены ограничения, накладываемые на функционирование каналов. Рассмотрена тенденция развития цифровых каналов связи.

*Ключевые слова:* каналы, пропускная способность, источник, приемник, контейнер, битовый поток.

В последнее время создается большое количество проприетарных (от англ. proprietary — стандарт, закрытый для разработчиков) каналов связи с использованием радиомодулей для различных применений: задач телеметрии, дистанционного управления, организации доступа к сети Интернет, локальной связи между устройствами, передачи видео- и аудиоданных.

В случае когда новая технология создается при поддержке большой компании или ассоциации производителей, осуществляется выделение новой полосы частот, в иных случаях используются нелицензируемые свободные диапазоны (ISM, PMR и др.)

При таком подходе каждая реализация конкретного коммуникационного протокола оказывается узкоспециализированной для определенного приложения. Так, например, практически невозможно использовать готовые высокочастотные модули Bluetooth для передачи телеметрии или модули WiFi для передачи видеоданных между видеоплеером и телевизором. Проблема заключается в тесной интеграции интерфейсных и сервисных функций с радиомодулем, что, с одной стороны, делает дешевой реализацию устройств, для которых эти стандарты изначально были разработаны, но, с другой стороны, препятствует применению готовых стандартов обмена данными в новых устройствах.

В настоящей статье предлагается способ унификации структуры каналов связи для упрощения интеграции вновь разрабатываемых систем, приводится классификация каналов связи и формулируются базовые ограничения.

**Классификация каналов связи.** Введем следующую классификацию цифровых каналов передачи данных (ЦКПД).

1. Унарный (проприетарный) ЦКПД — канал, не требующий идентификации типа потока данных; является самым простым видом канала точка—точка, в котором потребитель непосредственно получает данные одного типа от передатчика.

2. Мультиплексируемый ЦКПД — канал, допускающий передачу нескольких типов данных (контента), разделяемых маркером-идентификатором (ID пакета) или с помощью алгоритма.

3. Универсальный ЦКПД — канал, который в общем случае соединяет множество потребителей с множеством источников и допускает несколько типов данных. Под источником понимается устройство или программа, формирующие битовый поток данных (bit stream) и имеющие заданные ограничения на возможность управления скоростью этого потока. При использовании универсального канала требуется введение специальных полей в потоке данных для адресации и идентификации их типа. Типичным примером такого канала являются TCP/IP-сети.

**Структура каналов связи.** Традиционный унарный канал передачи данных, использующий радиоканал, представляет собой систему подготовки контента для более эффективной

модуляции несущей с генератора  $G$ , причем способ подготовки и тип модуляции определяют протокол связи (рис. 1).

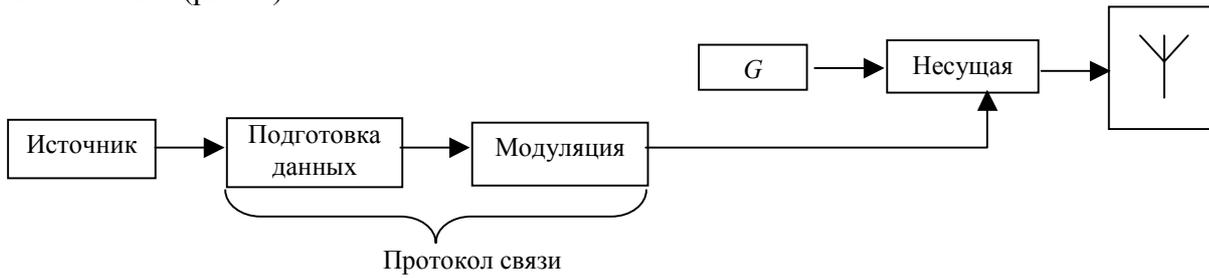


Рис. 1

В целях унификации структуры цифровых каналов передачи данных рассмотрим более подробную схему, абстрагируясь от физической природы среды унарного ЦКПД и допуская возможность модификации данных для их компрессии, шифрования и т.п. (рис. 2).

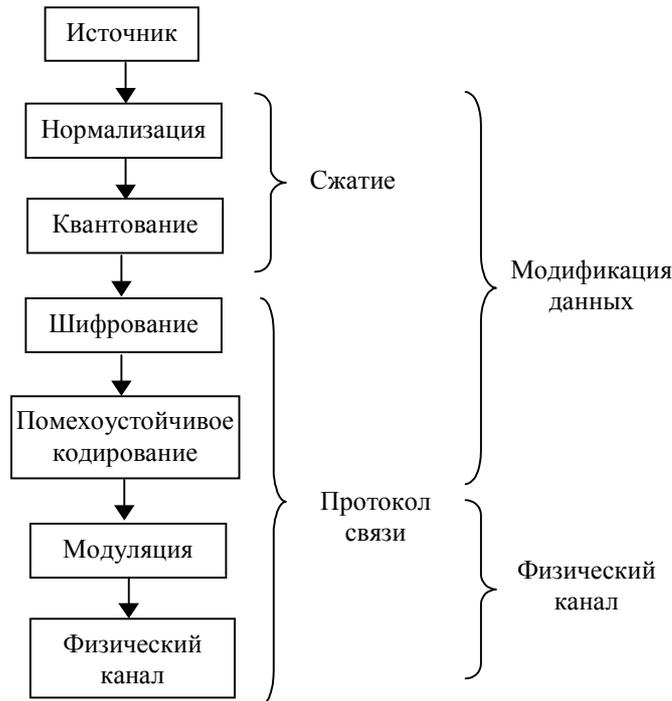


Рис. 2

Приведенная детальная схема демонстрирует последовательность этапов подготовки (модификации) данных и передачи их по физической среде; при этом протокол связи определяется не только типом модуляции, но и всеми этапами преобразования данных.

**Ограничения условий функционирования каналов связи.** Введем следующие обозначения:  $X$ ,  $Y$  — битовая последовательность данных источника и приемника соответственно;  $S_X$ ,  $S_Y$  — скорость потока данных источника и приемника соответственно, бит/с;  $L_X$ ,  $L_Y$  — длина битовой последовательности данных источника и приемника соответственно, бит;  $S(t)$  — динамическая скорость потока данных в момент времени  $t$ , бит/с.

При однократной передаче сообщения будем считать  $0 < S_X < S_{\max}$ , т.е. скорость потока  $S_X$  ограничена сверху физическими возможностями источника (скоростью считывания  $S_{\max}$ ).

В случае необходимости передачи сообщения в реальном времени (периодической) существуют следующие ограничения:  $S_{\min} < S_X < S_{\max}$ ; при этом  $S_{\min}$  — скорость передачи данных, ограниченная особенностями передаваемого контента. Так, например, при передаче видеоданных скорость потока задана видеостандартом:  $S_X = S_{\min} = S_{\max}$ .

В соответствии с определением цифровой коммуникации [1] передаваемые данные должны быть приняты неизменными, т.е.  $X=Y \Rightarrow L_X=L_Y$ , что позволяет записать следующее ограничение на параметры цифрового канала связи:

$$C\tau \geq L_X,$$

где  $C$  — пропускная способность цифрового канала,  $\tau$  — время передачи данных.

Используя это соотношение, можно оценить необходимую минимальную пропускную способность канала для сообщения  $X$  при заданном времени передачи  $\tau$  или минимальное время передачи при заданной пропускной способности канала  $C$ .

Основное свойство цифрового канала связи — возможность управления параметрами передачи данных в целях оптимизации времени передачи и скорости канала — определяется как

$$\int_{\tau} S(t)dt \leq C\tau \text{ или } \sum_{\tau} S(t)\Delta t \leq C\tau,$$

где  $\Delta t=L_X/S_X$  — временной отрезок, на котором значение  $S$  постоянно.

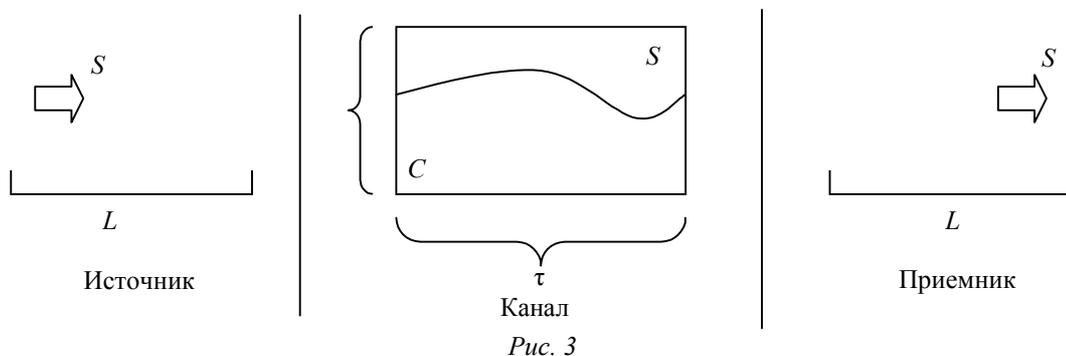
Этим свойством определяется возможность передачи потока данных, скорость которого в некоторые моменты времени может превышать пропускную способность канала:  $S(t) > C$ .

Учитывая постулат Колмогорова о существовании программы  $p$  для передачи последовательности  $X$  [2], причем  $L(p) \leq L_X$  (в худшем случае последовательность  $X$  будет представлена в виде программы „вывода самой себя“ с накладными расходами  $\delta$ ), получаем соотношение

$$S(t) + \delta \leq S_X \Rightarrow C \leq S_X.$$

При однократной передаче данных  $\delta \leq C$ , а при периодической —  $C \sim E$ , где  $E$  — энергетические затраты на организацию канала с пропускной способностью  $C$ .

Приведенные соотношения, определяющие ограничения пропускной способности каналов, можно представить графически (рис. 3).



**Заключение.** Сформулированные базовые ограничения, накладываемые на функционирование каналов, позволили реализовать ряд алгоритмов для организации подготовки к передаче и компрессии данных [3—5], а также сформулировать утверждение о возможности компенсации недостаточной пропускной способности канала путем увеличения времени передачи данных в случае, когда параметры физического канала не обеспечивают необходимых потребностей [6].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. СПб: Наука, 2008. 244 с.
2. Колмогоров А. Н., Успенский В. А. К определению алгоритма // Успехи математических наук. 1958. Т. 13, вып. 4. С. 3—28.

3. Кулешов С. В. Реконфигурируемая коммуникационная платформа передачи радиолокационных данных // Вопр. радиоэлектроники. 2010. Вып. 1. С.173—177.
4. Кулешов С. В. Методы оптимизации энергопотребления при организации цифровых каналов связи // Материалы Пятой науч.-практ. конф. „Перспективные системы и задачи управления“. Таганрог: Изд-во Южн. фед. ун-та, 2010. С. 226.
5. Кулешов С. В. Формат представления реальных трехмерных сцен для объемного телевидения (True3D Vision) // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 4. С. 49—52.
6. Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В. Концепция программируемой технологии цифровой теории связи: от герц к бит/с // Там же. 2007. Т. 5, № 6. С. 62—72.

**Сведения об авторе**

**Сергей Викторович Кулешов**

— канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; E-mail:kuleshov@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

УДК 004.896

В. А. КАРГИН, О. В. МАЙДАНОВИЧ, М. Ю. ОХТИЛЕВ

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО КОНТРОЛЮ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ  
СОСТОЯНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Представлен системный анализ результатов испытаний космических комплексов и управления ими. Предложены решения по внедрению элементов новой информационной технологии мониторинга состояния сложных технических объектов в реальном масштабе времени.

***Ключевые слова:** информационная поддержка принятия решений, система информации, ракетно-космический комплекс, мониторинг состояния космических средств, реальный масштаб времени.*

Стратегический характер и сложность задач, возлагаемых на средства ракетно-космической техники, с одной стороны, обусловили резкое ужесточение временных и других ресурсных ограничений на процесс принятия решений как при проведении испытаний, так и при штатной эксплуатации космических средств (КС), а с другой — привели к возрастанию объемов информации, поступающей в центры управления полетами (ЦУП), на командные пункты (КП), контрольно-измерительные станции заводов-изготовителей (ЗИ), технические и стартовые комплексы (ТК, СК) космодромов. Все это происходит на фоне снижения уровня квалификации технического персонала и большой текучести кадров на заводах-изготовителях, на космодромах и объектах наземной космической инфраструктуры (НКИ). Заказчики космических комплексов не имеют возможности оперативно и эффективно воздействовать на эксплуатирующие организации, предприятия-разработчики и изготовителей по вопросам повышения надежности и безопасной эксплуатации РКК [1].

Для обеспечения процесса испытаний ракетно-космических комплексов (РКК) и управления ими создана и функционирует система информации о техническом состоянии и надежности РКК, основная цель которой — достоверная оценка состояния космических средств и их подсистем для определения готовности к выполнению поставленных задач. Традиционно решение задач анализа и оценивания технического состояния и надежности, а также принятие

решений по управлению РКК осуществляется персоналом дежурных смен, руководителями расчетов подготовки и пуска, техническим руководством на всех этапах испытаний и эксплуатации существующих и перспективных ракетных, космических и наземных комплексов. Практика испытаний космических комплексов и управления ими показывает, что при возникновении неисправностей, отказов или аварий лица, принимающие решения, из-за сложности интерпретации результатов мониторинга не справляются с оперативным оцениванием гигантских объемов разнородной информации и, как следствие, несвоевременно формируют управляющее воздействие [2].

При оценивании технического состояния и надежности РКК обычно различают два основных этапа — этапы первичной и вторичной обработки информации. В настоящее время найдены достаточно приемлемые решения по вопросам автоматизации первичной обработки отдельных видов информации (телеметрической, баллистической, командно-программной, навигационной) без их системной интеграции [3—5]. По вопросам вторичной обработки или автоматизированного анализа информации, хотя этой проблеме и уделялось серьезное внимание, за последние 20—25 лет нельзя отметить сколько-нибудь значительных сдвигов, приведших к кардинальным изменениям [6, 7].

Для отдельных КС (как правило, обитаемых космических аппаратов) существуют версии специального программного обеспечения для автоматизированного анализа информации. Однако трудозатраты на разработку этих версий столь велики, а используемые в их основе методы (алгоритмы) столь уникальны, что ни сами версии, ни опыт их разработки неприемлемы для широкого круга потребителей информации (ЦУП, КП, контрольно-измерительных станций ЗИ, СК, ТК), обеспечивающих как процессы проведения испытаний, так и непосредственно управление сложными техническими средствами.

Комплексный анализ результатов испытаний РКК и управления ими позволил выявить и обобщить недостатки, присущие системе информации о техническом состоянии и надежности РКК [8].

1. Каждый из потребителей информации имеет в своем составе разнообразный по назначению и принципам построения широкий спектр программно-аппаратных средств взаимодействия с контролируемыми космическими комплексами, которые в большинстве своем морально и физически устарели.

2. Отсутствует единая для всех потребителей автоматизированная база данных и знаний об этапах жизненного цикла космических комплексов — от проектирования до вывода из эксплуатации, что приводит:

— к низкой оперативности получения информации о качестве функционирования и надежности космических комплексов (особенно при возникновении нештатных и аварийных ситуаций) и принятию несвоевременных решений по их дальнейшей эксплуатации;

— к низкому уровню достоверности и объективности оценки технического состояния и надежности космических комплексов вследствие ограниченного доступа к имеющейся у потребителей (предприятий-разработчиков, изготовителей, организаций, эксплуатирующих данные комплексы) информации о причинах неисправностей, отказов и аварий, а также об эффективности проведенных доработок.

3. Отсутствует единая технология разработки программных средств для решения конкретных задач информационного обеспечения, что не позволяет достичь приемлемых характеристик функционирования системы информации о техническом состоянии и надежности РКК.

Для устранения указанных недостатков предлагается от эвристических алгоритмов оценивания технического состояния и надежности РКК перейти к теоретически и методически обоснованным алгоритмам анализа состояния РКК и управления им. Для этого необходимо создать распределенную автоматизированную систему информационной поддержки принятия решений (АСИППР), обеспечивающую эффективное решение задач мониторинга РКК.

Создаваемая АСИППР должна обеспечить:

- автоматизированную обработку потоков информации о состоянии объекта управления с отображением ее в реальном масштабе времени в удобном для пользователя виде;
- автоматизированную идентификацию состояния объекта управления и выдачу рекомендаций по управлению им лицам, принимающим решение;
- возможность моделирования реакции объекта управления на различные управляющие воздействия на основе использования системы имитационного моделирования;
- получение пользователями справочной информации по устройству, принципам функционирования, правилам эксплуатации объекта управления и его составных частей, а также статистических данных о параметрах его функционирования;
- возможность индивидуальной настройки параметров функционирования АСИППР и интерфейса ее взаимодействия с пользователями.

Для создания АСИППР предлагается использовать интеллектуальную информационную технологию (ИИТ) автоматизации процессов мониторинга состояния КС в реальном масштабе времени [2], для которой характерны:

- сбор, формализация, верификация и коррекция всех необходимых для мониторинга состояния КС данных и знаний, осуществляемые технологами предметной области, а не инженерами-программистами;
- организация вычислений в составе распределенной системы информационного обеспечения, возможность создания системы разнородных математических моделей, достаточно адекватных контролируемым процессам и явлениям, даже при наличии факторов, разрушающих информацию и снижающих ее достоверность;
- возможность обеспечения удобного для пользователя интерфейса и диалога с информационной системой и отображения (представления) обработанных данных с помощью средств когнитивной графики;
- единая для всех потребителей автоматизированная база данных и знаний об этапах жизненного цикла космических комплексов — от проектирования до вывода из эксплуатации;
- единая технология автоматизированного проектирования и разработки различных программно-аппаратных средств (от устройств управления силовым оборудованием до человеко-машинного интерфейса);
- серийное производство унифицированных программно-технических комплексов с применением оптимальных технологических процессов разработки;
- надежное резервирование информации на аппаратно-программном уровне с применением обработанных средств самодиагностики оборудования.

Следует отметить, что синтез АСИППР для конкретных целей и условий применения должен производиться на основе использования конкретных экспертных эвристических методик или ИИТ, их реализующих и ориентированных зачастую на нечеткость и слабую формализуемость достигаемых при информационном обеспечении целей, выполняемых задач и принимаемых решений.

Таким образом, использование ИИТ автоматизации процессов мониторинга состояния КС в реальном масштабе времени для создания АСИППР позволит сформировать единую базовую систему информационного обеспечения на всех этапах жизненного цикла КС, что приведет к существенному повышению достоверности и оперативности получения всеми потребителями информации, необходимой для принятия решения по выполнению целевых задач [9]. Реализация АСИППР, построенной на базе ИИТ, позволит повысить эффективность деятельности руководителей всех уровней благодаря следующим факторам:

- реализации функций получения и визуализации в интерактивно формируемом виде обобщенных результатов мониторинга состояния космических аппаратов, ракет-носителей, объектов НКИ и других объектов управления;

- формированию рекомендаций по идентификации состояния объекта и принятию соответствующих решений в условиях жестких временных ограничений;
- максимальному взаимодействию со всеми участниками проекта, учету их знаний и интересов за счет итерационного сквозного режима проектирования;
- оперативному уточнению в ходе разработки сложных динамических моделей функционирования технологических процессов АСИППР;
- повышению надежности и эффективности процессов мониторинга объектов за счет поддержки в принятии решений по предупреждению аварий и катастроф, в поиске причин возникновения неисправностей;
- интеграции существующих специализированных программных комплексов в единую систему мониторинга и управления и их кроссплатформенности.

Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 10-08-90027, 09-07-00066, 08-08-00403, 09-07-11004), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Россиев А. Ю. Автоматизированная система управления подготовкой и пуском ракет космического назначения как корпоративная информационная система // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 7. С. 78—83.
2. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. М.: МО СССР, 1984. 563 с.
4. Козырев Г. И., Назаров А. В., Обрученков В. П. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб: Наука и техника, 2007. 668 с.
5. Каргин В. А., Николаев Д. А., Нездоровин Н. В. и др. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном масштабе времени // Информация и космос. 2009. № 4. С. 77—82.
6. Стёпкин В. С., Шмыголь С. С. Автоматизированная обработка и анализ измерительной информации. М.: МО СССР, 1980.
7. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Чуприков А. Ю. и др. Перспективные направления развития информационных технологий мониторинга состояния сложных технических объектов в реальном масштабе времени // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 11. С. 50—59.
8. Каргин В. А., Россиев А. Ю. Анализ основных проблем при создании автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения // Науч. сессия ГУАП: Сб. докл.; Ч. II. Технические науки. СПб: ГУАП, 2010. С. 173—175.
9. Охтилев М. Ю., Чуприков А. Ю., Ничипорович О. П. др. Унифицированная информационная технология мониторинга динамически изменяющихся состояний космических средств и средств НКУ на основе измерительной информации и представления его результатов на индивидуальных и коллективных средствах отображения // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 5. С. 20—24.

#### Сведения об авторах

- Виктор Александрович Каргин** — канд. техн. наук; ЗАО „СКБ ОРИОН“, Санкт-Петербург; E-mail: vic\_kargin@mail.ru
- Олег Владимирович Майданович** — канд. техн. наук, доцент; Космодром „Плесецк“, г. Мирный; начальник космодрома; E-mail: sid.sn@yandex.ru
- Михаил Юрьевич Охтилев** — д-р техн. наук, профессор; ЗАО „СКБ ОРИОН“, Санкт-Петербург; зам. генерального конструктора; E-mail: oxt@mail.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

А. С. ЛЬВОВ, Р. Р. ФАТКИЕВА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ WEB-СЕРВИСОВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКОГО ДИАГНОЗА

На основе семантического анализа информации о пациенте в совокупности с ее онтологическим моделированием описываются понятия предметной области и обсуждается проблема постановки медицинского диагноза. Рассматривается возможность применения платформы SWeb для разработки сервисно-ориентированной архитектуры.

*Ключевые слова:* онтологическое моделирование, медицинская диагностика, web-сервисы.

**Введение. Постановка задачи.** Поиск диагностической информации в существующих справочниках и базах данных в том виде, в котором он осуществляется в настоящее время, не является совершенным. В этой области можно выделить, по крайней мере, три распространенные проблемы: нерелевантность поиска, большое разнообразие способов представления и организации данных, неполнота поиска.

Нерелевантность определяется как несоответствие результата поиска ожиданиям пользователя, что обусловлено недостаточностью и ограниченностью объема данных, выбранных пользователем для поиска. Это, в свою очередь, связано с проблемой отсутствия единообразия в представлении данных. Неполнота поиска объясняется возможностью различным образом представить одну и ту же аномалию множеством синтаксических конструкций. Для осуществления семантического поиска в существующих медицинских документах необходим предварительный анализ их содержания, основная цель которого — улучшение структурирования информации. Семантический анализ развивает идею распознавания образов, т.е. чрезвычайно сжатых понятий, представленных в документах, где не учитывается ни конкретное содержание понятие, ни его лексическая составляющая. Можно сказать, что семантический поиск — это поиск по ключевым понятиям, а семантическое представление документа — это множество присутствующих в нем понятий или семантических категорий.

Как показывает анализ работ [1—3], в настоящее время для решения задачи постановки диагноза используется статистическое и математическое моделирование процесса развития болезни с возможностью поиска симптомов и клинических проявлений, что затруднительно для понимания врачом, а использование экспертных систем, как правило, ограничено рамками одного учреждения без возможности расширения базы диагнозов.

В настоящей статье предлагается один из подходов к семантическому анализу медицинских данных, заключающийся в использовании онтологического моделирования для описания предметной области, в рамках которой осуществляется постановка медицинского диагноза на основе соответствующей симптоматики.

Разработка онтологии диагностики позволяет определить термины предметной области без привязки к какой-либо роли, функциональности или значению данного термина в программном обеспечении, определить классы заболеваний и описать понятия предметной области. Класс может иметь подклассы, представляющие более конкретные понятия, чем надкласс, и позволяющие ввести иерархию. Фрагмент иерархии основных понятий разработанной онтологии „Медицинский диагноз“ представлен на рис. 1.

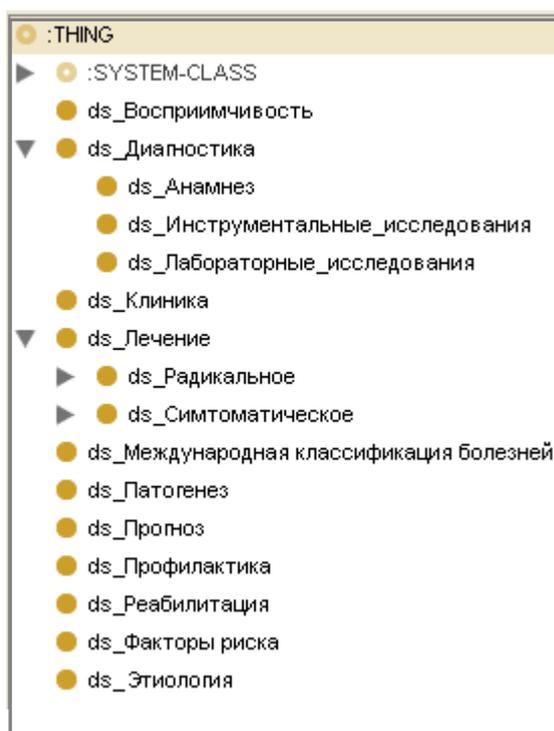


Рис. 1

**Web-сервисы для обеспечения постановки диагноза.** Установление правильного диагноза и своевременное начало лечения являются приоритетными как для жизни пациента, так и для системы здравоохранения в целом, что позволяет осуществить взаимодействие последней с системой страховой медицины в оперативном режиме. Для осуществления этого взаимодействия возможно использование платформы SWeb [4], разработанной в соответствии с концепцией сервисно-ориентированной архитектуры и реализованной с помощью web-сервисов и XML-технологий. При проектировании платформы особое внимание необходимо уделить технической возможности доступа с мобильных устройств к онтологии „Медицинский диагноз“ с обеспечением следующих свойств web-сервисов:

- интеграция сервисов и многопользовательский доступ;
- наличие независимых web-сервисов, управляющих бизнес-процессами;
- наличие специально разработанного „универсального формата“ SUF (SWeb-Universal Format), который при необходимости может быть заменен любым другим форматом.

Архитектура платформы, представленная на рис. 2, состоит из следующих уровней: клиентский уровень (Node A); уровень взаимодействия пользователя с системой (Node B); первый корпоративный уровень (Node C); второй корпоративный уровень (Node D); уровень интеграции процессов системы (Node E).

На клиентском уровне и уровне взаимодействия осуществляется прием запроса, аутентификация пользователя и отсылка запроса вновь клиентскому уровню, отвечающему за основные сервисы, хранение и обработку запросов, а также оповещение пользователя. Хранение запросов осуществляется при помощи XML-базы данных, уведомление пользователя осуществляется с помощью SMS-сообщений или по электронной почте. Посредством обработчика запросов обеспечивается взаимодействие между первым корпоративным уровнем и остальными уровнями. На уровне интеграции осуществляется предоставление связи с существующими административными сервисами.

Платформа SWeb базируется на современных стандартах и технологиях безопасности, например, таких, как PKI (Public Key Information) второго поколения и улучшенные механизмы криптографии XML (ГОСТ Р 34.10-2001), сертификация X.509 (ГОСТ Р 34.10-94), WS-Security (Web Services Security), шифрование и цифровая подпись XML, а также маркеры доступа (SAML).

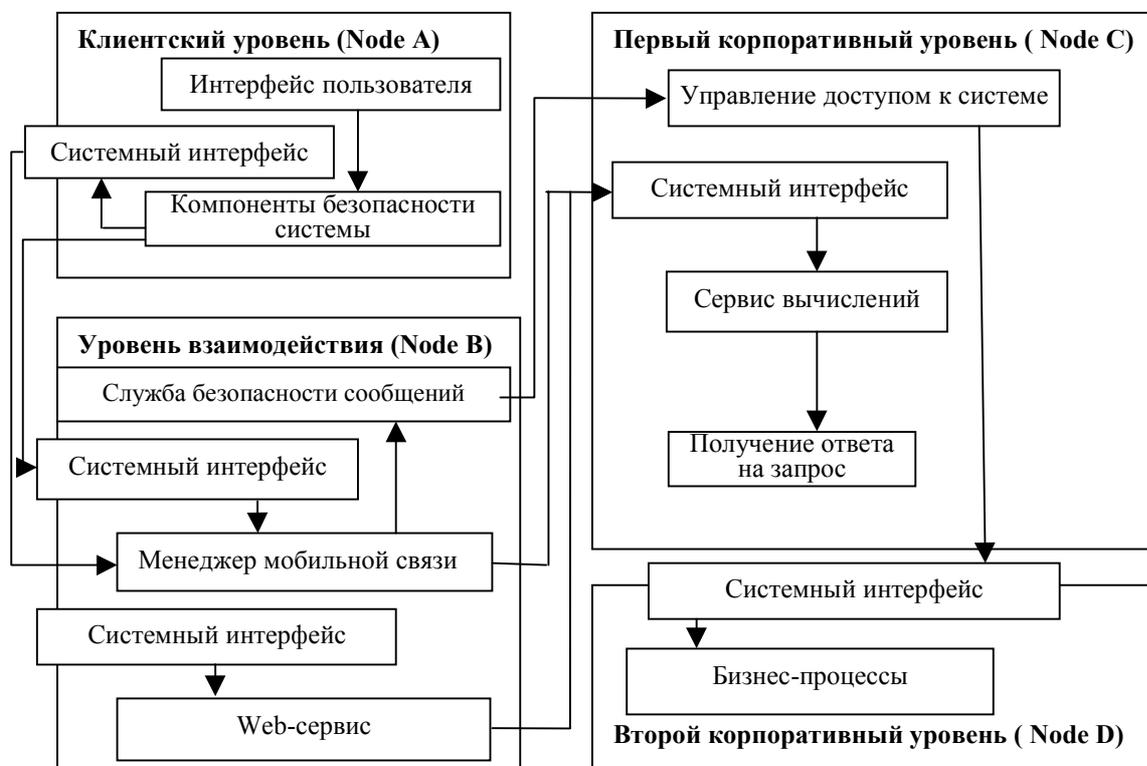


Рис. 2

**Заключение.** Предложенный способ онтологического описания медицинской информации в сочетании с web-сервисной технологией на базе платформы SWeb позволяет существенно повысить эффективность и качество сервиса при постановке диагноза и обработке медицинской документации наряду с уменьшением стоимости вычислительных операций и времени ожидания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаткиева Р. Р., Львов А. С. Онтологический метод поиска лекарственных препаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 11. С. 57—59.
2. Москаленко Ф. М. Параллельный оптимизированный алгоритм медицинской диагностики // Информатика и системы управления. 2006. № 1(11). С. 87—98.
3. Орлов В. А., Клещев А. С. Компьютерные банки знаний. Многоцелевой банк знаний // Там же. 2006. № 12. С. 2—8.
4. Электронный ресурс: <[www.focus.fraunhofer.de/egov](http://www.focus.fraunhofer.de/egov)>.

#### Сведения об авторах

**Александр Сергеевич Львов**

— аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационно-вычислительных систем; E-mail: [vvi@iias.spb.su](mailto:vvi@iias.spb.su)

**Роза Равильевна Фаткиева**

— канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория информационно-вычислительных систем; E-mail: [rikki2@yandex.ru](mailto:rikki2@yandex.ru)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

---

---

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ

---

---

УДК 519.711.72

А. Н. ПАВЛОВ, С. А. ОСИПЕНКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В рамках концепции генома структуры представлен анализ характеристик безопасности сложных технических объектов. В качестве характеристик выбраны значимость и вклад событий, приводящих к авариям объектов.

*Ключевые слова:* монотонные и немонотонные системы, геном структуры, показатели безопасности, П-сеть, Н-сеть.

В настоящее время значительный потенциальный риск представляют сложные технические объекты, при функционировании которых возможны аварийные и нештатные ситуации, приводящие к катастрофам. К числу таких объектов, в первую очередь, относятся промышленные и научно-исследовательские установки ядерной энергетики и химической промышленности, установки и комплексы вооружения Министерства обороны РФ. Аварийные и нештатные ситуации, как правило, труднопредсказуемы и возникают внезапно. Масштабы связанных с ними негативных последствий также труднопредсказуемы, могут лавинообразно увеличиваться с течением времени и, кроме того, повлечь за собой различные негативные последствия для других объектов. Информация об аварийных ситуациях, как правило, имеет противоречивый и неопределенный характер и поступает в систему управления объектом с временными задержками. Принятие решений в таких ситуациях связано с риском и осуществляется в условиях жесткого лимита времени и различных ограничений по выбору и реализации управляющих воздействий.

Основная проблема при оценке безопасности сложных технических объектов связана с получением объективной информации о безотказности их элементов, статистические данные о параметрах которых недостаточны для проведения соответствующей стандартной обработки и анализа. Указанная проблема вызвана следующими причинами [1]: для отдельных объектов такие данные зачастую либо вообще отсутствуют, либо труднодоступны; построение вероятностной модели объекта требует большого объема наблюдений, которые, как правило, оказываются неполными, неточными и противоречивыми; процесс построения большой выборки наблюдений длителен по времени, в течение которого объект и окружающая его среда изменяются, что приводит к некорректности получаемых вероятностных и статистических закономерностей.

Для исследования надежности, живучести и безопасности сложных технических объектов в условиях возникновения нерасчетных нештатных ситуаций, аварий и катастроф (которые в дальнейшем будем называть критическими ситуациями) можно построить [2—11] сценарии их развития и соответствующие им функции алгебры логики (ФАЛ). При исследовании

указанных ситуаций вводятся выраженные в полиномиальном виде функции надежности или функции отказов на основе ортогонализации ФАЛ и замещения логических аргументов вероятностями их истинности, а логических операций — соответствующими арифметическими. Однако оценить вероятность наступления негативных событий в этом случае также затруднительно. Поэтому при исследовании критических ситуаций целесообразно определить весомость каждого конкретного негативного события, для чего следует проанализировать и сравнить различные характеристики событий, приводящих к таким ситуациям. По результатам анализа можно выделить события, на которые стоит обратить первостепенное внимание, и определить, с отказами каких элементов объекта они связаны.

В общем случае для структурно-сложных объектов (систем) в работах [6—11] введено понятие генома структуры, представляющего собой вектор  $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ , компонентами которого являются коэффициенты функции отказа структуры, представленной полиномом  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , состоящим из однородных элементов  $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ . Используя геном структуры, можно вычислить интегральные оценки отказа объекта, связанного с его структурным построением. При вероятностном описании отказов элементов системы для однородной монотонной или немонотонной структуры (характеризующихся одинаковой вероятностью отказа элементов) интегральный показатель отказа вычисляется по формуле [3, 8]

$$F(\chi) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1} \right)^T, \quad (1)$$

а для неоднородной структуры (характеризующейся различными вероятностями отказа элементов системы) — по формуле

$$F'(\chi) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n} \right)^T. \quad (2)$$

При описании отказов элементов системы с позиции теории возможностей интегральный показатель возможности отказа для монотонной однородной структуры вычисляется по формуле

$$F_B(\chi) = 1 - \mu_*, \quad (3)$$

где  $\mu_*$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*$ ; для немонотонной однородной структуры этот показатель определяется как

$$F'_B(\chi) = \mu_{**}, \quad (4)$$

где  $\mu_{**}$  — решение уравнения  $(\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) (1, \mu_{**}, \mu_{**}^2, \dots, \mu_{**}^n)^T = \mu_{**}$ .

Предлагаемый подход можно использовать для вычисления различных характеристик события, приводящего к критическим ситуациям (например, весомость события, его значимость, вклад в критическую ситуацию, т.е. степень влияния на нее). В настоящей статье рассмотрим введенные в работах [4, 5] такие характеристики события, как его значимость, положительный и отрицательный вклады в критическую ситуацию.

Для вычисления степени значимости  $i$ -го события относительно причин возникновения аварии следует воспользоваться полиномом [2—5]

$$\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0},$$

где  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1}$  — функция отказа объекта при выходе из строя  $i$ -го элемента,

$T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}$  — функция отказа объекта при безотказной работе  $i$ -го элемента.

Полиномы для вычисления положительных и отрицательных вкладов событий в критическую ситуацию имеют следующий вид [2—5]:

$$B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=1} - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),$$

$$B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = -(T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) - T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0}).$$

Необходимо отметить, что для вычисления указанных характеристик не требуется знать вероятности наступления входящих в сценарий событий. В работах [2—5] значимость и вклады  $i$ -го события рассчитываются по следующим формулам:

$$g_i = \xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n}, \quad \beta_i^+ = B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n},$$

$$\beta_i^- = B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \Big|_{Q_i=0,5, i=1, \dots, n},$$

где запись  $Q_i = 0,5, i = 1, \dots, n$ , означает, что в соответствующий полином вместо всех  $Q_i$  необходимо подставить 0,5.

Каждому из рассматриваемых полиномов  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  ставится в соответствие геном  $\chi_\xi^i$ ,  $\chi_+^i$ ,  $\chi_-^i$ , используя который можно вычислить значимость и вклады событий по формуле (2):

$$g_i = \chi_\xi^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T, \quad \beta_i^+ = \chi_+^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T, \quad \beta_i^- = \chi_-^i \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T.$$

Следовательно, с помощью геномов  $\chi_\xi^i$ ,  $\chi_+^i$ ,  $\chi_-^i$ , можно вычислять эти характеристики с использованием как вероятностных оценок однородных структур (см. формулу (1)), так и оценок возможности отказа монотонных и немонотонных структур (см. формулы (3), (4)).

Кроме того, важно отметить, что полиномы  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , вне зависимости от того, характеризует функция отказа  $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  монотонную или немонотонную систему, имеют одно из нижеперечисленных свойств:

— монотонно возрастают, сохраняют „0“ и „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 0$ ,  $\xi_i(1) = 1$ ;  $\beta_i^+(0) = 0$ ,  $\beta_i^+(1) = 1$ ;  $\beta_i^-(0) = 0$ ,  $\beta_i^-(1) = 1$ ;

— монотонно убывают, не сохраняют „0“ и „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 1$ ,  $\xi_i(1) = 0$ ;  $\beta_i^+(0) = 1$ ,  $\beta_i^+(1) = 0$ ;  $\beta_i^-(0) = 1$ ,  $\beta_i^-(1) = 0$ ;

— немонотонны, сохраняют либо „0“, либо „1“: т.е.  $\xi_i(0) = 1$ ,  $\xi_i(1) = 1$ ;  $\xi_i(0) = 0$ ,  $\xi_i(1) = 0$ ;  $\beta_i^+(0) = 1$ ,  $\beta_i^+(1) = 1$ ;  $\beta_i^+(0) = 0$ ,  $\beta_i^+(1) = 0$ ;  $\beta_i^-(0) = 1$ ,  $\beta_i^-(1) = 1$ ;  $\beta_i^-(0) = 0$ ,  $\beta_i^-(1) = 0$ .

Проведем исследование того, как влияет на степень значимости события и величину его вкладов в критическую ситуацию замена элементов монотонной структуры на инверсные (негативные) элементы. Данная операция переводит монотонные полиномы  $\xi_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^+(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $B_i^-(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , сохраняющие „0“ и „1“, в полиномы, обладающие одним из вышеперечисленных свойств. Исследования будем проводить на простейших последовательно-параллельных структурах (П-сетях) и простейшей сложной структуре (простейшая Н-сеть — „мостиковая структура“).

Если в структуру (П-сеть, Н-сеть) ввести элементы, описываемые немонотонными ФАЛ (например,  $\bar{x}_i$  — инверсный элемент), то в целом такая структура будет представлена

немонотонной ФАЛ первого типа [2]. Исследуем простейшие неразложимые П-сети при наличии и отсутствии инверсных элементов; структуры таких сетей приведены на рис. 1.

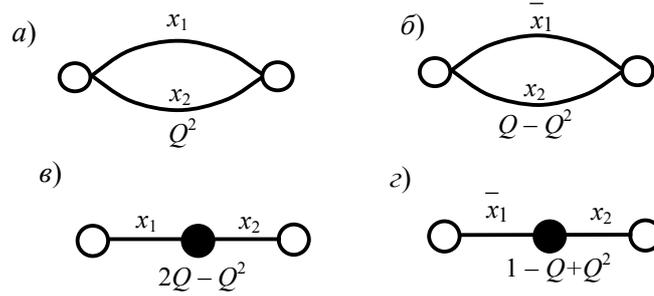


Рис. 1

Геномы представленных на рис. 1, а—г структур имеют соответственно следующий вид:  $\chi_a = (0, 0, 1)$ ,  $\chi_{б} = (0, 1, -1)$ ,  $\chi_в = (0, 2, -1)$ ,  $\chi_г = (1, -1, 1)$ .

Вычислим вероятностные интегральные показатели отказа приведенных однородных и неоднородных структур по формулам (1), (2):

$$F(\chi_a) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1} \right)^T = 0,333, \quad F(\chi_{б}) = 0,167, \quad F(\chi_в) = 0,667, \\ F(\chi_г) = 0,833;$$

$$F'(\chi_a) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \left( 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n} \right)^T = 0,25, \quad F'(\chi_{б}) = 0,25, \quad F'(\chi_в) = 0,75, \quad F'(\chi_г) = 0,75.$$

Интегральные показатели возможности отказа однородных монотонных и немонотонных структур (см. рис. 1), вычисленные по формулам (3), (4), имеют соответственно следующие значения:

$$F_B(\chi_a) = 0,382, \quad F_B(\chi_{б}) = 0,236, \quad F_B(\chi_в) = 0,618, \quad F_B(\chi_г) = 0,764, \\ F'_B(\chi_a) = 0,382, \quad F'_B(\chi_{б}) = 0,382, \quad F'_B(\chi_в) = 0,618, \quad F'_B(\chi_г) = 0,618.$$

Рассмотрим несколько вариантов введения инверсных элементов в мостиковую структуру (рис. 2).

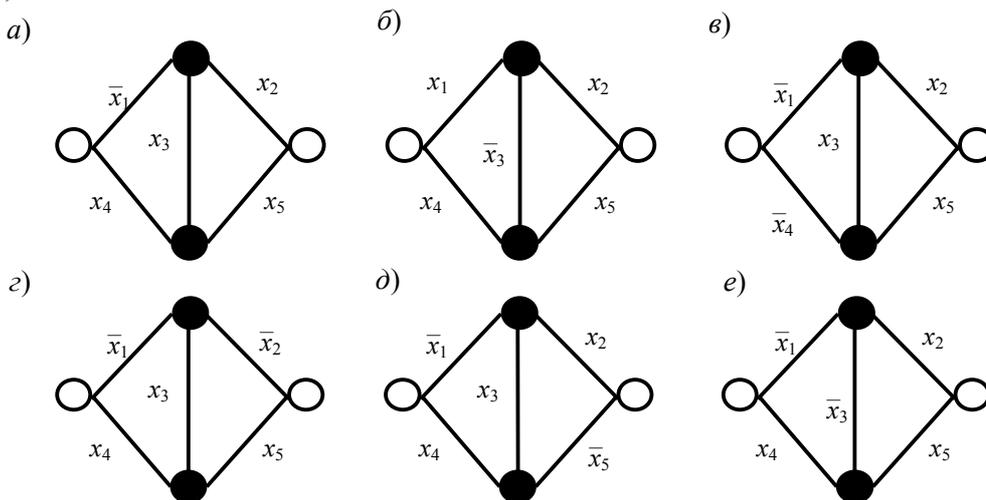


Рис. 2

Для однородных структур (см. рис. 2, а—е) функции отказа и соответствующие им геномы имеют следующий вид:  $T_a(Q) = Q + Q^2 - 4Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$ ,  $\chi_a = (0, 1, 1, -4, 5, -2)$ ;  $T_б(Q) = 4Q^2 - 6Q^3 + 5Q^4 - 2Q^5$ ,  $\chi_б = (0, 0, 4, -6, 5, -2)$ ;  $T_в(Q) = 1 - 2Q + Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5$ ,

$$\chi_b = (1, -2, 1, 4, -5, 2); \quad T_c(Q) = 2Q - 3Q^2 + 4Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5, \quad \chi_c = (0, 2, -3, 4, -5, 2);$$

$$T_d(Q) = 3Q - 7Q^2 + 8Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5, \quad \chi_d = (0, 3, -7, 8, -5, 2); \quad T_e(Q) = 2Q - 4Q^2 + 6Q^3 - 5Q^4 + 2Q^5,$$

$$\chi_e = (0, 2, -4, 6, -5, 2).$$

Несмотря на то, что мостиковая структура имеет инверсные элементы, функции отказа для вариантов, приведенных на рис. 2, *a, б, д, e*, являются монотонными, сохраняющими „0“ и „1“ ( $T_a(0) = T_b(0) = T_d(0) = T_e(0) = 0$ ,  $T_a(1) = T_b(1) = T_d(1) = T_e(1) = 1$ ). Для вариантов, приведенных на рис. 2, *в, з*, функции отказа немонотонные:  $T_v(0) = 1$ ,  $T_v(1) = 1$ ,  $T_z(0) = 0$ ,  $T_z(1) = 0$ .

Результаты вычисления вероятностных оценок и оценок возможности отказа различных структур сведены в таблицу.

| Вариант<br>(рис. 2) | Вероятностная оценка структуры |              | Оценка возможности отказа структуры |              |
|---------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|
|                     | однородной                     | неоднородной | однородной                          | неоднородной |
| <i>a, б, д, e</i>   | 0,5                            | 0,5          | 0,5                                 | 0,5          |
| <i>в</i>            | 0,667                          | 0,5          | 0,586                               | 0,5          |
| <i>з</i>            | 0,333                          | 0,5          | 0,414                               | 0,5          |

В заключение отметим следующее. Используемые в работах [2—5] вероятностные оценки значимости событий и их вкладов в критическую ситуацию нечувствительны к введению в структуру инверсных элементов, описываемых немонотонными ФАЛ. В основе предложенных в настоящей статье оценок лежит концепция генома структуры, что позволяет учитывать влияние инверсных элементов, а также оценить диапазон изменения степени значимости негативных событий и их вкладов в критическую ситуацию. Поэтому при исследовании надежности, живучести и безопасности сложных технических объектов использование предложенных оценок может оказаться полезным для получения дополнительной (по сравнению с существующими подходами) информации о состоянии объекта и наиболее опасных его элементов (узлов, компонентов), а также для выработки рекомендаций по повышению надежности и безопасности.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08–08–00346, 08–08–00403, 09–08–00259, 10–08–90027), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О–2.3/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пытьев Ю. П.* Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 464 с.
2. *Горопашная А. В.* Методы анализа безопасности сложных технических систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2009.
3. *Рябинин И. А., Черкесов Г. Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
4. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность сложных систем. СПб: Политехника, 2000. 248 с.
5. *Можжаев А. С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Л.: ВМА, 1988. 67 с.
6. *Павлов А. Н.* Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем // Материалы XI Междунар. конф. „Региональная информатика-2008 (РИ—2008)“. СПб: СПИИРАН, 2008. С. 48—49.
7. *Павлов А. Н., Соколов Б. В.* Многокритериальная кластеризация структурных состояний катастрофоустойчивых информационных систем // Материалы XV Междунар. конф. „Проблемы управления безопасностью сложных систем“. М.: ИПУ РАН, 2008. С. 150—153.

8. Павлов А. Н. Исследование генома двухполюсной сетевой структуры // Тр. IX Междунар. науч. школы „Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах“. СПб: ГУАП, 2009. С. 429—434.
9. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Структурная динамика катастрофоустойчивой информационной системы // Там же. С. 85—93.
10. Павлов А. Н., Соколов Б. В., Сорокин М. В. Анализ структурной динамики комплексной системы защиты информации // Информация и безопасность. 2009. Т. 12, № 3. С. 389—396.
11. Павлов А. Н., Соколов Б. В., Осипенко С. А. Обобщенный алгоритм формирования классов структурных состояний информационных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 4. С. 3—8.

#### Сведения об авторах

- Александр Николаевич Павлов** — канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: pavlov62@list.ru
- Сергей Александрович Осипенко** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедрa автоматизированных систем управления космическими аппаратами, Санкт-Петербург; E-mail: fon\_vakano@mail.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

УДК 004.942:303.444

О. В. СМЕРНОВА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКОВ, ВЫЗВАННЫХ КАТАСТРОФИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Рассматривается новый базирующийся на использовании геоинформационных технологий комплексный подход к оценке рисков, вызванных катастрофическими явлениями, в частности цунами. Предложенный метод позволяет связать параметры источников волн цунами, среды их распространения и береговой инфраструктуры с последствиями катастроф и сформировать динамические карты рисков.

**Ключевые слова:** катастрофа, методы оценки рисков, карты рисков.

**Введение.** В настоящее время геоинформационные технологии находят широкое применение при решении различных задач анализа и прогнозирования катастрофических природных и техногенных явлений (землетрясений, снежных лавин, оползней, ураганов, цунами, пожаров, взрывов, разливов нефти и др.). В современных геоинформационных системах (ГИС) анализа чрезвычайных ситуаций помимо эффективных методов визуализации пространственных данных о катастрофических явлениях предусматривается наличие специальных методов моделирования их поведения. Именно возможности применения этих методов во многом определяют эффективность ГИС для потребителей. При разработке таких методов моделирования необходимо не только формализовать анализируемые катастрофические явления, но и адаптировать эти методы к готовым базовым геоинформационным технологиям.

Анализ известных подходов к моделированию катастрофических явлений свидетельствует, что многие методы проработаны недостаточно. В этой связи в настоящей статье предлагается один из возможных подходов к оценке рисков, вызванных, в частности, цунами, адаптированный к использованию в современных геоинформационных системах.

**Постановка задачи.** Рассмотрим действующую геоинформационную систему анализа чрезвычайных ситуаций, в которой отсутствует подсистема оценки рисков, вызванных цунами. Необходимо дополнить эту систему соответствующими технологиями и методами, применение которых позволит наблюдать возможное развитие процессов зарождения цунами в заданном географическом районе и отражать их последствия.

В интересах разработки такого подхода учтем достигнутые ранее результаты. Известны модели и методы анализа цунами [1—5], отражающие закономерности этого явления. Среди них значительное внимание уделено аналитическому моделированию цунами [1—3, 6]. Одна из первых попыток сформулировать основные задачи неустановившегося волнового движения жидкости с учетом неровностей дна и возникающих при этом явлений была сделана в работе [1]. Там же была затронута проблема краткосрочного прогноза цунами на основе сейсмической информации. Многочисленные исследования по моделированию волн цунами и поиску аналитических решений задач волновой гидродинамики проведены в Сибирском отделении Российской академии наук [2—4]. Ряд работ посвящен исследованию потенциально опасных территорий, выявлению различных подводных источников цунами и построению их моделей [2], а также установлению зависимостей влияния формы и других характеристик источника на параметры фронта возникающей волны [3].

Несмотря на значительное число работ, посвященных цунами, многие аспекты не нашли должного отражения. Это вопросы, связанные с особенностями условий поведения цунами в зависимости от характеристик источника, среды распространения волн, рельефа дна, природных и искусственных препятствий и других факторов. Единый подход к оценке возможных вызванных цунами последствий как функций от времени, с учетом случайного характера этого процесса, отсутствует.

Допустим в рамках предлагаемого подхода, что в исследуемом сейсмоопасном районе моря возможно возникновение цунами. Допустим также, что имеется статистика по зарегистрированным случаям этого явления и установлен ряд зависимостей, связывающих параметры очагов цунами с параметрами генерируемых волн. Доступны базы данных [6, 7] по рельефу дна и батиметрии района. Определены береговые объекты, находящиеся в потенциально опасных районах, например отдельные и групповые объекты, включая населенные пункты, порты, нефтеналивные терминалы и т.д.

Необходимо спрогнозировать возможные риски, вызванные цунами, для береговых объектов.

**Метод оценки рисков.** Принимая во внимание особенности анализируемого процесса, выделим в нем три специфические стадии:

- проявление источника цунами — формирование волны определенного (конкретного) типа в соответствии с ее разрушающей силой;
- распространение волны и накат на берег;
- непосредственное воздействие на береговые объекты.

Учтем, что формирование конкретных типов волн осуществляется с некоторыми вероятностями. При этом процессы проявления конкретных волн характеризуются своими плотностями распределения времени наступления событий.

Оценку рисков, вызванных цунами, предлагается осуществлять с применением метода, включающего в себя следующие шаги.

1. Разделение множества возможных типов волн цунами на группы по их параметрам. Определение на основе имеющейся статистики (для этих групп волн и исходных состояний очагов) плотностей распределения времени генерации типовых волн, по которым могут быть вычислены соответствующие вероятности наступления событий в зависимости от времени. Распознавание исходных состояний очагов цунами.

2. Расчет параметров наката волны на берег в местах расположения заданных береговых объектов для каждой выделенной группы волн цунами.

3. Оценка рисков, вызванных каждым из типов волн, относительно рассматриваемых береговых объектов.

4. Расчет математического ожидания возможных рисков для береговых объектов на заданном интервале времени с учетом неопределенности момента генерации волны.

Рассмотрим особенности каждого из перечисленных шагов. Плотности распределения времени проявления  $i$ -х волн  $f_i(t)$  могут быть определены заранее и в дальнейшем должны только уточняться. Для распознавания текущих состояний очагов цунами на основе анализа регистрируемых данных возможно применение известных методов [8].

Для расчета параметров наката волны на берег в ряде случаев также применимы известные модели и методы. При допущении, что морская вода является идеальной жидкостью, в качестве модели цунами можно использовать систему дифференциальных уравнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ([h(x) + \eta]u) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\eta$  — параметр, характеризующий разность между уровнем водной поверхности и высотой возмущенной волны;  $u$  — горизонтальная скорость водного потока,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $h(x)$  — глубина акватории в отсутствие возмущений.

Решив систему (1) численными методами для каждого  $i$ -го варианта начальных условий, получим  $B_i(t)$  — параметры  $i$ -х волн, накатывающих на берег, в заданных географических районах; к таким параметрам относятся амплитуда и крутизна волны (в частном случае можно ограничиться одним параметром, например амплитудой волны).

Заметим, что при сделанных допущениях в системе (1) не учитываются вязкость воды и структура грунта дна. Кроме этого, не проработаны многие аспекты, связанные с решением системы уравнений (1) для сложных рельефов дна. Для более точного определения параметров волны, накатывающей на берег, эти факторы можно учесть путем моделирования процесса распространения таких волн с применением специальных геоинформационных технологий.

Оценка рисков, вызванных каждым из типов волн цунами в момент времени  $T$ , предусматривает учет не только свойств волны, но и характеристик поражаемых объектов, применяемых защитных сооружений, рельефа суши. Для определения такой оценки, с учетом неопределенности генерации цунами, предлагается рассчитывать  $\bar{B}_i(T)$  — математические ожидания вычисления параметров  $i$ -х волн, накатывающих на берег в момент времени  $T$ :

$$\bar{B}_i(T) = \int_0^T B_i(T-t) f_i(t) dt.$$

Именно в зависимости от параметров  $\bar{B}_i(T)$  предлагается оценивать условные риски  $W_{ij}(\bar{B}_i(T))$  для конкретных  $j$ -х объектов. Эти частные условные риски могут быть определены, например, экспертным путем или путем моделирования на основе применения современных геоинформационных технологий, а также с помощью решения специальных аналитических задач. К таким задачам относятся оценка уровня затопления территории, оценка вероятности возникновения экологических угроз и др.

Результирующий прогнозируемый риск на момент времени  $T$  с учетом предыдущих условий и вероятностей  $P_i$  проявления  $i$ -х волн предлагается рассчитывать по формуле

$$W_{\Sigma}(T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}(\bar{B}_i(T)) P_i, \quad (2)$$

где  $m$  — число заданных береговых объектов.

Риск  $W_{\Sigma}(T)$  согласно выражению (2) является текущим. Прогнозирование рисков на заданных интервалах времени возможно посредством получения интегральных оценок.

**Особенности применения метода в составе геоинформационных систем.** В отличие от известных методов предлагаемый подход позволяет прогнозировать риски в режиме реального времени в условиях существенной неопределенности возникновения очагов цунами. Применение метода связано с рядом особенностей. В частности, предложенный метод позволяет оперативно отражать в геоинформационных системах динамику риска и оценивать значения ущерба в зависимости от параметров волн и очагов опасности. Пространственный анализ, выполненный средствами ГИС с применением данного метода, дает возможность представить результат прогнозирования рисков в виде серии тематических карт. На этих картах с учетом пространственной привязки к конкретному району могут быть отображены зоны, характеризующиеся конкретными показателями  $W_{\Sigma}(T)$  как для отдельных, так и групповых береговых объектов. Создание тематических карт предполагает формирование шкалы для принятого показателя  $W_{\Sigma}(T)$ , связывающей уровни риска с характером разрушающих воздействий. На основе полученных динамических цифровых карт возможно принятие решений по снижению рисков и планированию мероприятий по защите побережья от цунами.

**Заключение.** Рассмотрен новый базирующийся на использовании геоинформационных технологий метод оценки рисков, вызванных цунами. Предложенный метод, учитывающий неопределенность возникновения очагов цунами и условия распространения волн, может найти широкое применение в современных геоинформационных системах анализа чрезвычайных ситуаций. По аналогии с этим методом могут быть разработаны также подходы к оценке рисков, вызванных другими катастрофическими явлениями (например, прорывом плотин и наводнениями).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973.
2. Марчук А. Г., Грошев Е. Б., Чубаров Л. Б. Численное моделирование поведения волн цунами в шельфовой зоне // Исследование цунами. 1986. № 1. С. 94—102.
3. Новиков В. А., Федотова З. И., Кузьмичева Т. В. О некоторых проблемах моделирования наката длинных волн на берега сложных очертаний // Вычислительные технологии. 1993. № 4. С. 196—209.
4. Хакимзянов Г. С. Численное моделирование косоугольного взаимодействия уединенной волны с вертикальной стенкой // Моделирование в механике. 1992. Вып. 6(23). № 1. С. 141—146.
5. Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами. Нижн. Новгород: ИПФ РАН, 1996.
6. Canadian Topographic Digital Maps [Электронный ресурс]: <<http://www.etopo.ca/>>.
7. Tsunami Laboratory: Historical Tsunami Database for the World Ocean [Электронный ресурс]: <<http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>>.
8. Айвазян С. А., Бухитабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Д. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989.

#### Сведения об авторе

**Оксана Вячеславовна Смирнова** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория объектно-ориентированных геоинформационных систем; E-mail: [sov@oogis.ru](mailto:sov@oogis.ru)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

В. А. ДЕСНИЦКИЙ, И. В. КОТЕНКО

## КОМБИНИРОВАННАЯ ЗАЩИТА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Рассматривается подход к построению комбинированного механизма защиты программ от несанкционированных воздействий на основе принципов „удаленного доверия“. Предложенный подход обеспечивает достижение компромисса между суммарным уровнем защиты и масштабируемостью механизма.

*Ключевые слова:* защита программ, несанкционированные модификации, принципы „удаленного доверия“, атаки на программы и защита от них.

**Введение.** Проблема защиты программного обеспечения от несанкционированных воздействий (изменений, модификаций) является одной из наиболее важных и актуальных проблем в области информационной безопасности. В настоящее время наблюдается все большее число несанкционированных модификаций, совершаемых злоумышленниками, с последующим неправомерным использованием программ. К подобным программам, требующим защиты от модификаций, может быть отнесен широкий спектр программных приложений, таких как корпоративные программы и системы документооборота предприятия, пакеты офисных программ, операционные системы, сетевые и коммуникационные программы, а также отдельные программные компоненты, встраиваемые в операционные системы, текстовые и графические редакторы, интегрированные среды разработки, компиляторы. При этом в настоящее время не существует полностью надежных и универсальных решений проблемы защиты, позволяющих гарантировать безопасность и правильность работы программы, функционирующей в ненадежном окружении.

При реализации эффективной защиты программного обеспечения (ПО) на основе „клиент-серверной“ архитектуры важнейшим препятствием к ее осуществлению является необходимость приемлемой масштабируемости механизма защиты.

Таким образом, актуальность исследования проблемы защиты ПО от несанкционированных воздействий не вызывает сомнений. Одной из основных задач таких исследований является построение стойкого и масштабируемого механизма защиты, позволяющего гарантировать безопасное и неизменное выполнение большого числа удаленных клиентских программ.

В отличие от известных моделей механизмов защиты, таких как Pioneer [1], SWAT [2], Genuinity [3] и других, осуществляющих защиту ПО на базе „клиент-серверной“ архитектуры и реализующих, в частности, принцип удаленной аттестации, предлагаемая в настоящей статье модель характеризуется динамическим характером защиты, которая описывается следующими свойствами:

— динамическим изменением отдельных методов защиты, используемых в рамках общего механизма защиты: в частности, могут быть изменены применяемые в механизме алгоритмы, криптографические схемы, сетевые протоколы;

— динамической установкой и вводом в действие различных программных модулей используемых методов защиты; установка модулей осуществляется без перезагрузки и приостановки работы механизма защиты в целом и защищаемой им программы.

Выбор конкретных методов осуществляется в зависимости от характеристик их ресурсопотребления (потребления вычислительных ресурсов) и степени их защиты. При этом установка программного модуля защиты выполняется как на клиентской, так и на серверной

сторонах сетевого соединения, что гарантирует непрерывное корректное выполнение процесса защиты и целевых функций программы.

**Модель механизма защиты.** Разработанная модель механизма защиты ПО от несанкционированных воздействий относится к классу структурно-функциональных моделей и описывает основные структурные элементы механизма, их функции и возникающие между ними взаимосвязи. Модель описывает также процесс управления защитой, на основе которого администратор системы может управлять механизмом защиты в реальном времени.

Основными объектами предлагаемой модели защиты являются прикладная клиентская программа, которая выполняется на ненадежном хосте, и удаленный защищенный сервер, функционирующий на надежном хосте [4]. Объектом защиты является клиентская программа. Основная цель механизма защиты — гарантия корректности и неизменности выполнения клиентской программы, функционирующей в потенциально враждебном программно-аппаратном окружении. Нарушение корректности и неизменности программы может происходить вследствие намеренных воздействий со стороны нарушителя. Требование неизменности программы предполагает отсутствие возможности выполнения нарушителем каких-либо несанкционированных воздействий, которые могут изменить ход ее работы, в результате чего программа перестанет выполняться корректно.

Угроза неизменности выполнения программы связана как непосредственно с несанкционированными модификациями ее кода или программного состояния, так и с влиянием на программу опосредованно — со стороны ее программно-аппаратного окружения. В последнем случае такое влияние осуществляется, например, посредством использования разнообразных отладчиков бинарного кода и эмуляторов [5, 6], что позволяет без каких-либо изменений программного кода или состояния программы изменить характер ее функционирования.

Любой пользователь, выполняющий или пытающийся выполнить какие-либо несанкционированные действия, называется атакующим, а последовательность действий, осуществляемых им для достижения своих целей, — атакой на программу.

Среди возможных атак на механизм защиты можно выделить следующие: процесс обратной разработки (reverse-engineering), модификация кода программы, динамическое изменение состояния программы, воздействие на среду выполнения программы, перехват и замена сетевого трафика между сервером и клиентом. Отдельного рассмотрения заслуживает такой тип атаки, как „клонирование“: в этом случае одновременно выполняются две или более копии программ, при этом предполагается, с одной стороны, выполнение корректной копии программы, с помощью которой осуществляется взаимодействие клиента с доверенным сервером и при необходимости с другими удаленными сетевыми сущностями, а с другой — выполнение несанкционированно измененной копии программы. Таким образом, любое сетевое взаимодействие модифицированной копии целенаправленно прерывается атакующим, а все необходимые данные для ее работы нарушитель получает посредством анализа сетевого трафика, приходящего и исходящего от корректной копии программы.

**Принципы „удаленного доверия“.** Предлагаемый механизм защиты базируется на следующих основных принципах „удаленного доверия“ [4].

*Архитектура „клиент-сервер“.* Этот принцип предполагает реализацию механизма защиты с использованием доверенного сервера, функциями которого являются, во-первых, слежение за состоянием клиентской программы и обнаружение каких-либо отклонений, свидетельствующих о нарушениях безопасности (функция обнаружения), и, во-вторых, реагирование на подобные изменения (функция реагирования).

*Удаленная аттестация.* Этот принцип заключается во внедрении в клиентскую программу специализированного программного модуля — монитора, который собирает данные о ходе выполнения программы и отправляет их для проверки на сторону доверенного сервера. Принцип реализуется посредством применения таких методов, как проверка инвариантов,

проверка контрольных сумм и др. Данный принцип направлен на осуществление сервером функции обнаружения.

*Разделение кода (code splitting).* Данный принцип состоит в том, что в коде клиентской программы выделяются и переносятся на сторону доверенного сервера определенные фрагменты, являющиеся наиболее критичными по отношению к информационной безопасности. В результате атакующий не имеет прямого доступа к процессу выполнения кода на отдельных участках, а следовательно, не может на него воздействовать. Примером метода защиты, реализующего данный принцип, является метод барьерного разделения (barrier slicing).

*Динамическое замещение.* Принцип состоит, во-первых, в регулярном замещении монитора его новой версией и, во-вторых, в замещении некоторых наиболее критически важных фрагментов кода программы измененными фрагментами. Такое периодическое обновление в обоих случаях направлено на усложнение осуществления атак на механизм защиты и защищаемую им клиентскую программу.

**Требования к механизму защиты.** Сформулируем основные требования, предъявляемые к механизму защиты:

— *построение механизма защиты на основе принципов „удаленного доверия“:* реализация этих принципов осуществляется посредством применения различных отдельных методов защиты, каждый из которых включает определенные криптографические и иные алгоритмы защиты и строится на определенных теоретических принципах; разнообразие методов и принципов защиты позволяет повысить стойкость механизма защиты в целом;

— *динамическое изменение совокупности используемых методов защиты:* эффективность той или иной совокупности методов защиты зависит от соотношения объемов ресурсов доверенного сервера и особенностей функционирования клиентских программ; модель механизма защиты включает возможность отслеживания изменений определенных характеристик доверенного сервера, в том числе объема доступных ресурсов, и пересмотра текущей комбинации методов защиты;

— *добавление и установка программных модулей защиты в режиме реального времени:* предполагается возможность удаления из механизма защиты тех методов, которые признаны уязвимыми или для которых существуют более эффективные способы реализации; после корректной установки модуля защиты и необходимых действий по достижению механизмом защиты определенных требований данный метод может быть использован; при выполнении этого требования важным является то, что загрузка программного модуля и его удаление осуществляются без приостановления процесса защиты и перезапуска клиентского и серверного ПО;

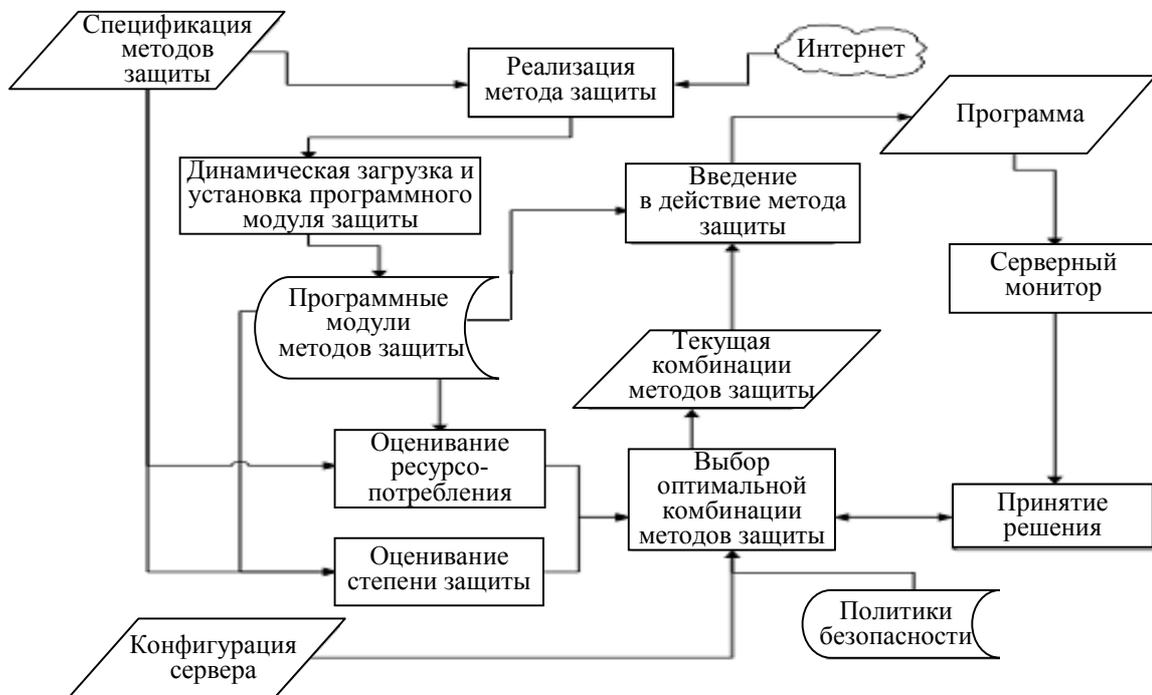
— *дифференциация клиентов:* образование иерархии работающих с клиентскими программами пользователей на основе их ролей, привилегий и мандатов, а также использование политик безопасности как способа задания определенных особенностей механизма защиты; политики безопасности используются также для единообразного управления механизмом защиты.

На рисунке показана структура механизма защиты, демонстрирующая его основные сущности и связи.

**Реализация механизма защиты.** Реализация механизма защиты сводится к решению следующих задач: оценивание параметров ресурсопотребления каждого из используемых отдельных методов защиты; определение степени защиты, которую способен обеспечить каждый из методов, а также определение суммарной степени защиты механизма в целом; постановка и решение задачи по нахождению оптимальной комбинации методов защиты; обеспечение динамического характера реализуемого механизма защиты.

*Оценивание параметров ресурсопотребления* происходит эмпирически на основе моделирования отдельных методов защиты и процедур вычисления показателей ресурсопотребления. Определяются следующие показатели: количество  $p(m_i)$  фактов использования метода  $m_i$ ,

исполнение которых доверенный сервер способен поддерживать и контролировать корректно; объем  $p^r(m_i)$  ресурса  $r$  доверенного сервера, который необходим для реализации метода  $m_i$ ; суммарный показатель ресурсопотребления  $p^r(\tilde{M})$ , характеризующий ресурсопотребление комбинации методов защиты  $\tilde{M}$ . Кроме того, определяется вектор ограничений на ресурсы сервера  $C[r]$ .



При построении механизма защиты, рассматриваемого в настоящей статье, были реализованы процедуры вычисления следующих показателей ресурсопотребления:  $p^{(1)}$  — показатель интенсивности нагрузки центрального процессора (CPU) сервера при реализации метода защиты;  $p^{(2)}$  — объем памяти, необходимый для реализации метода защиты на стороне доверенного сервера. Значения показателя  $p^{(1)}$  для метода „контроля потока управления“ (Control Flowchecking [7]) программой ( $m_1$ ), метода проверки инвариантов ( $m_2$ ), метода барьерного разделения ( $m_3$ ) и метода ортогонального замещения ( $m_4$ ) в зависимости от количества клиентов ( $u$ ) приведены в табл. 1 [5, 6, 8, 9].

Таблица 1

| $u$ | $p^{(1)}, \%$ |       |       |       |
|-----|---------------|-------|-------|-------|
|     | $m_1$         | $m_2$ | $m_3$ | $m_4$ |
| 10  | 8,7           | 7,2   | 59,9  | 61,1  |
| 20  | 17,4          | 14,3  | 95,6  | 81,5  |
| 25  | 21,8          | 37,8  | —     | 92,0  |
| 50  | 43,5          | 35,7  | —     | —     |
| 100 | 87,1          | 71,3  | —     | —     |

*Оценивание степени защиты*, обеспечиваемой каждым из методов, базируется на анализе экспертных мнений, что обусловлено значительной сложностью построения метода оценивания на основе формальных подходов. Процесс оценивания степени защиты включает формирование группы экспертов; формулировку заданий (оценивание каждого из предложенных методов защиты по 10-балльной шкале); опрос экспертов и получение данных от них; математическую обработку полученных данных; представление и анализ результатов.

В табл. 2 приведены полученные в ходе экспериментов, на основе анализа экспертных мнений, усредненные значения степени защиты для некоторых методов [5, 6, 8, 9].

Таблица 2

| Метод защиты                              | Степень защиты |
|---|----------------|
| Метод „контроля потока управления“        | 4,3            |
| Метод проверки инвариантов                | 3,3            |
| Метод барьерного разделения               | 9,0            |
| Метод ортогонального замещения            | 7,8            |
| Метод „crypto guards“*                    | 6,2            |
| Метод непрерывного замещения              | 7,1            |
| Метод обфускации „непрозрачные предикаты“ | 1,3            |

\* П р и м е ч а н и е : название метода (букв.: криптозащита) приведено в редакции разработчика [6].

*Определение оптимальной комбинации методов защиты* понимается как достижение наивысшей масштабируемости механизма защиты при заданных уровне ресурсопотребления и степени защиты. Оптимизационная задача формулируется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} p(\tilde{M}) &\rightarrow \max_{\tilde{M} \in 2^M}; \\ \sum_{m_i \in \tilde{M}} p^{(r)}(m_i) &\leq C[r] \quad \forall r : r \in R; \\ \sum_{m_i \in \tilde{M}} s(m_i) &\geq \hat{s}, \end{aligned} \right\}$$

где  $s$  — степень защиты каждого из методов  $m_i$ .

Таким образом, данная постановка задачи предполагает максимизацию показателя  $p(\tilde{M})$  на множестве возможных комбинаций методов защиты при ограничении „сверху“ на суммарное значение показателя ресурсопотребления (при  $|R|$  неравенств такого вида) и ограничении на суммарную степень  $\hat{s}$  защиты. Помимо решения данной задачи методом полного перебора, авторами разрабатывается более быстрый способ решения, предусматривающий применение определенных оптимизаций процесса вычисления, что позволит уменьшить количество комбинаций методов защиты.

*Динамический характер механизма защиты* реализуется на основе применения средств аспектно-ориентированного программирования, позволяющих проводить динамические изменения программы путем добавления небольших фрагментов кода — аспектов — в ходе ее выполнения [10].

**Заключение.** Предложен подход к построению механизма защиты ПО от несанкционированных воздействий (модификаций) на основе принципов „удаленного доверия“. Помимо требования поддержки должного уровня предоставляемой защиты разработанный механизм реализует также функции повышения его масштабируемости путем поиска наиболее эффективной комбинации отдельных методов, входящих в механизм защиты. Основным результатом предложенного подхода является архитектура механизма защиты, включающая реализацию предъявляемых к нему основных требований. Представлены детальное формальное описание механизма защиты и принципов „удаленного доверия“, на которых он базируется, а также результаты разработки и реализации более точных методов оценивания ресурсопотребления и степени защиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-01-00826), программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 3.2), а также при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза “SecFutur”, “Massif” и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seshadri A., Luk M., Shi E. et al.* Pioneer: verifying code integrity and enforcing untampered code execution on legacy systems // Proc. of the 20th ACM Symp. on Operating Systems Principles (SOSP '05). N.Y.: ACM Press, 2005.
2. *Seshadri A., Perrig A., Doorn L.V., Khosla P.* SWATT: Software-based attestation for embedded devices // Proc. of the IEEE Symp. on Security and Privacy. 2004 [Электронный ресурс]: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1301329](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1301329)>.
3. *Kennell R., Jamieson L.H.* Establishing the genuinity of remote computer systems // Proc. of the 12th USENIX Security Symp. Washington, DC, 2003.
4. *Десницкий В. А., Коменко И. В.* Модель защиты программного обеспечения на основе механизма „удаленного доверия“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 23—30.
5. *Atallah M., Bryant E., Stytz M.* A survey of anti-tamper technologies // J. of Defence Software Engineering. 2004. Nov.
6. *Collberg C., Thomborson C.* Watermarking, tamper-proofing, and obfuscation — tools for software protection // IEEE Computer Society. 2001. Nov.
7. *Ахо А., Сети Р., Ульман Д.* Компиляторы. Принципы, технологии, инструменты. М.: Вильямс, 2003.
8. *Ceccato M., Preda M., Majumdar A., Tonella P.* Remote software protection by orthogonal client replacement // Proc. of the 24th ACM Symp. on Applied Computing (SAC 2009). 2009 [Электронный ресурс]: <<http://selab.fbk.eu/ceccato/papers/2009/sac2009.pdf>>.
9. *Ceccato M., Preda M., Nagra J. et al.* Barrier slicing for remote software trusting // Proc. of IEEE Intern. Working Conf. on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM 2007). Paris, 2007.
10. *Десницкий В. А.* Аспектно-ориентированный подход к реализации механизма мобильного модуля в системе защиты программного обеспечения // Материалы науч.-практ. симп. „Национальные информационные системы и безопасность государства“. М.: ОИТВС РАН, 2007.

*Сведения об авторах*

- Василий Алексеевич Десницкий** — СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; мл. науч. сотрудник; E-mail: [desnitsky@comsec.spb.ru](mailto:desnitsky@comsec.spb.ru)
- Игорь Витальевич Коменко** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: [ivkote@comsec.spb.ru](mailto:ivkote@comsec.spb.ru)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

И. В. КОТЕНКО, А. М. КОНОВАЛОВ, А. В. ШОРОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ БОТ-СЕТЕЙ И МЕХАНИЗМОВ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИМ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагается подход к исследованию бот-сетей и механизмов защиты от их воздействия, основанный на применении методов имитационного моделирования. Представлены общая формальная модель бот-сети и механизмов защиты, среда моделирования и результаты экспериментов.

*Ключевые слова:* бот-сети, модели атак, модели механизмов защиты, имитационное моделирование, агентно-ориентированное моделирование.

**Введение.** В настоящее время в сети Интернет наблюдается очевидная тенденция к распространению злоумышленниками так называемых бот-сетей. Бот-сети (от англ. botnet — *robot* и *network*), по существу, позволяют объединить в самостоятельную сеть вычислительные мощности большого количества уязвимых хостов. Целью данного объединения является выполнение таких действий, как, например, поиск уязвимых хостов, реализация атак типа „распределенный отказ в обслуживании“ (DDoS), рассылка „спама“, получение конфиденциальной информации. Функционирование бот-сетей характеризуется одновременными действиями большого количества бот-агентов в интересах злоумышленника. В большинстве случаев злоумышленник получает полный контроль над ресурсами инфицированного компьютера и может их беспрепятственно использовать.

Таким образом, исследование бот-сетей и механизмов защиты от их воздействия является актуальной проблемой. Одна из важнейших задач при решении данной проблемы — исследовательское моделирование бот-сетей и механизмов защиты в целях разработки эффективных методов и средств обнаружения этих сетей и противодействия им. В настоящей статье предложен подход к исследованию данной проблемы, базирующийся на объединении агентно-ориентированного моделирования и методов имитационного моделирования дискретных событий, сетевых событий и протоколов.

Проводимые в настоящее время исследования можно разделить на две категории. В первую категорию входят исследования, непосредственно посвященные разработке методов выявления бот-сетей и методов противодействия им. Например, выявление бот-сетей может быть основано на распознавании коллективных действий бот-агентов в сети [1], определении сигнатур коммуникационного трафика, инициируемого бот-агентами [2, 3], и обнаружении атак, проводимых бот-сетями [4, 5]. Ко второй категории относятся исследования, связанные с изучением бот-сетей [6, 7], в частности с выявлением и описанием их функций, а также измерением параметров их функционирования [8].

Одним из наиболее опасных типов атак, которые могут выполнять бот-сети, является „распределенный отказ в обслуживании“. Традиционные механизмы защиты от атак данного типа реализуются на основе последовательного выполнения двух процедур — распознавания атаки, выполняемой бот-сетью, и противодействия этой атаке. Процедура распознавания атаки основывается на поиске аномалий сетевого трафика и может быть решена различными методами (например, статистическими, методом сигнатурного поиска и т.п.).

**Общая формальная модель бот-сети и механизмов защиты.** Общую модель бот-сети и механизмов защиты будем описывать с использованием формальных теоретико-множественных конструкций.

Представим общую модель бот-сети и механизмов защиты в виде кортежа  $Q = \langle N, L, S, O \rangle$ , где  $N$  — множество узлов (хостов) вычислительной сети,  $L$  — множество связей между узлами вычислительной сети,  $S$  — сценарий реализации атаки,  $O$  — параметр, характеризующий действия пользователя.

Множество  $N$  узлов зададим в виде кортежа элементов:  $N = \langle T, R, P, F \rangle$ , где  $T$  — множество типов оборудования, соответствующее узлу вычислительной сети;  $R$  — множество функциональных ролей узла;  $P$  — множество компонентов программного обеспечения, используемого узлами;  $F : R \rightarrow P$  — функция, реализующая отображение множества функциональных ролей узла на множество компонентов программного обеспечения (ПО).

Программным и/или аппаратным компонентом ПО, является протокол, реализующий набор правил и позволяющий осуществлять соединение и обмен данными между двумя и более включенными в сеть устройствами.

Множество связей  $L$  между узлами вычислительной сети в контексте различных протоколов описывается следующим образом: считается, что узлы  $a, b$  сети связаны посредством некоторого протокола, если существует хотя бы одна непустая конечная последовательность с начальным узлом  $a$  и конечным узлом  $b$ , через которые будет проходить сообщение.

Сценарий реализации атаки  $S = \langle S_B, S_D, S_K \rangle$  содержит сценарии  $S_B$  функционирования бот-сети, сценарии  $S_D$  сдерживания бот-сети и противодействия атакам, а также сценарии  $S_K$  легитимной деятельности вычислительной сети. Каждый из сценариев  $S_B, S_D$  или  $S_K$ , в свою очередь, содержит множество подсценариев, цель сценария, алгоритм достижения цели, узлы, вовлеченные в сценарий; при этом может быть осуществлено разделение узлов на группы  $H_i \subset N$ , где  $i$  — номер группы, соответствующий исполняемым ролям или другим признакам.

Процесс детализации каждого из сценариев  $S_B, S_D, S_K$  можно итеративно продолжить. В этом случае каждый промежуточный сценарий становится объектом последующей декомпозиции. Сценарии  $S_B$  содержат подсценарии распространения бот-сети, управления ею и реализации атак. Сценарии  $S_D$  содержат подсценарии противодействия распространению бот-сети, противодействия управлению ею и противодействия реализации атак. Сценарии  $S_K$  предназначены для генерации шаблонов легитимного трафика.

Параметр  $O$ , характеризующий действия пользователя, необходим для оценки эффективности функционирования бот-сети и механизмов защиты.

Рассмотренная общая формальная модель бот-сети и механизмов защиты используется для построения имитационных моделей.

**Среда моделирования.** В настоящее время авторами используется и постоянно модернизируется многоуровневая инструментальная среда имитационного моделирования сетевых процессов для приложений в области защиты информации. Среда моделирования представляет собой программный комплекс, включающий в качестве нижнего уровня систему моделирования дискретных событий, а также ряд компонентов, реализующих сущности более высокого уровня.

Архитектура среды моделирования содержит четыре основных компонента:

- базовую систему имитационного моделирования (Simulation Framework);
- модуль имитации сети Интернет (Internet Simulation Framework);
- подсистему агентно-ориентированного моделирования (Agent-Based Framework);
- модуль процессов предметной области (Subject Domain Library), включающий сценарий реализации атаки в общей формальной модели бот-сети и механизмов защиты.

С использованием симулятора OMNeT++, библиотек INET Framework, ReaSE, а также собственных программных компонентов представленная архитектура была реализована в виде

модели противоборства команд интеллектуальных агентов при многоагентном моделировании бот-сетей, атак типа „распределенный отказ в обслуживании“ и механизмов защиты от воздействия бот-сети.

**Параметры моделирования.** Для проведения экспериментов было проведено моделирование вычислительных сетей, состоящих из 5—10 автономных систем. Каждая автономная система содержит примерно 300 конечных узлов. Оборудование узлов представлено типами „маршрутизатор“ и „хост“. Оборудование типа „хост“ представлено следующим множеством функциональных ролей: web-сервер, web-клиент, почтовый сервер, сервер мультимедийного контента, сервер „командный центр“, „уязвимый сервис“, „мастер“, IP-фильтр.

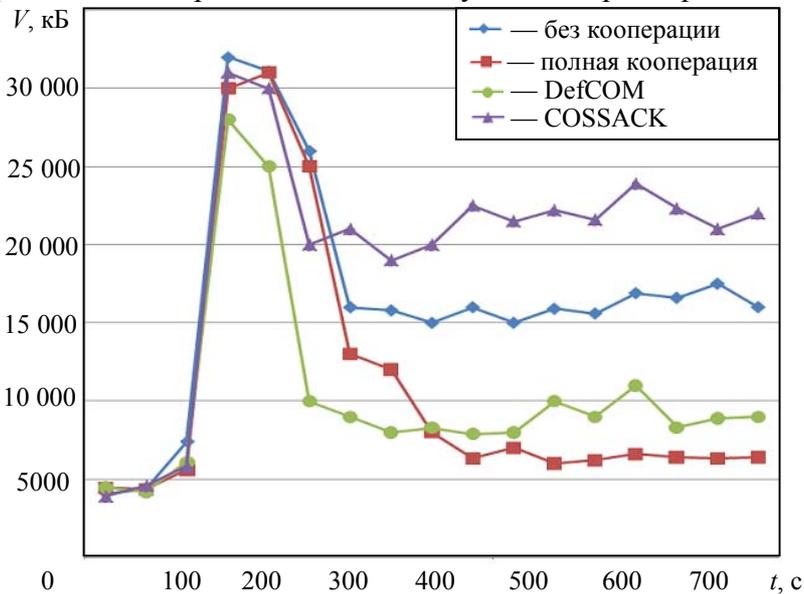
Команда интеллектуальных агентов атаки представлена агентами следующих типов: „мастер“, „командный центр“, „цель“, „зомби“. В ходе экспериментов определялись один агент „мастер“, один или несколько агентов „командный центр“ и множество агентов с уязвимым программным обеспечением, которые потенциально могут обратиться в „зомби“.

Команда интеллектуальных агентов защиты представлена следующими общими классами агентов: первичной обработки информации („сенсор“); вторичной обработки информации („сэмплер“); обнаружения атаки („детектор“); фильтрации („фильтр“); „расследования“; управления нагрузкой на коммуникационные каналы („ограничитель“).

Одним из примеров реализованных сценариев атаки, выполняемой бот-сетью, является атака типа UDP Flood, проводимая по отношению к некоторому узлу (подсети), IP-адрес которого (которой) указывается агентом „мастер“.

В ходе исследований было реализовано несколько сценариев сдерживания бот-сети и противодействия атакам DDoS: сценарий, реализуемый без кооперации интеллектуальных агентов защиты [9], с кооперацией типа DefCOM [10], с кооперацией типа COSSACK [11] и с полной кооперацией [9].

**Результаты экспериментов.** Оценка результатов реализации сценариев атак и сценариев защиты проводилась по следующим параметрам:



— количеству принадлежащих атакующему трафику входящих пакетов до и после фильтрации, выполняемой командами, защищающими атакуемую сеть (узел);

— количеству ошибок первого и второго рода (оценки false positive — FP — и false negative — FN), характеризующих результаты обнаружения атак командами интеллектуальных агентов защиты.

Результаты процесса фильтрации оценивались по значениям FP и FN. Например, значения этих оценок в одном

из экспериментов, при исследовании сценария защиты, реализуемого без кооперации агентов, были следующими: FP=0,002, FN=0,09.

На рисунке представлен график, демонстрирующий уровень трафика атаки внутри атакуемой подсети при использовании различных сценариев сдерживания бот-сети и противодействия атакам.

Как показали результаты экспериментов, сценарий, реализуемый при полной кооперации агентов, наиболее эффективен при защите от DDoS-атак, следующим по эффективности является метод DefCOM, а затем — защита без кооперации агентов и метод COSSACK.

**Заключение.** Рассмотрен подход к исследовательскому моделированию бот-сетей и механизмов защиты от их воздействия в сети Интернет. Представлены общая формальная модель бот-сети и механизмов защиты, архитектура разрабатываемой среды моделирования, предназначенной для анализа бот-сетей, и ее программная реализация. Проведенные эксперименты показали применимость предложенного подхода для моделирования бот-сетей и механизмов защиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-01-00826) и программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 3.2), а также при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза “SecFutur”, “Massif” и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gu G., Perdisci R., Zhang J., Lee W. BotMiner: Clustering analysis of network traffic for protocol- and structure-independent botnet detection // Proc. of the 17th USENIX Security Symp. (Security'08). San Jose, CA, 2008.
2. Goebel J., Holz T. Rishi: Identify bot contaminated hosts by IRC nickname evaluation // Proc. of the 1st Workshop on Hot Topics in Understanding Botnets (HotBots'07). Cambridge, MA, 2007.
3. Binkley J., Singh S. An algorithm for anomaly-based botnet detection // Proc. of the 2nd Conf. on Steps to Reducing Unwanted Traffic on the Internet (SRUTI'06). San Jose, CA, 2006.
4. Chen S., Song Q. Perimeter-based defense against high bandwidth DDoS attacks // IEEE Transact. on Parallel and Distributed System. 2005. Vol. 16. N. 7.
5. Mirkovic J., Dietrich S., Dittrich D., Reiher P. Internet Denial of Service: Attack and Defense Mechanisms. NJ: Prentice Hall PTR, 2004.
6. Dagon D., Gu G., Lee C., Lee W. A taxonomy of botnet structures // Proc. of the 23rd Annual Computer Security Applications Conf. (ACSAC'07). Florida, 2007.
7. Gianvecchio S., Xie M., Wu Z., Wang H. Measurement and classification of humans and bots in Internet chat // Proc. of the 17th USENIX Security Symp. (Security'08). San Jose, CA, 2008.
8. Bailey M., Cooke E., Jahanian F. et al. A survey of botnet technology and defenses // Proc. of the Cybersecurity Applications & Technology Conf. for Homeland Security. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009.
9. Kotenko I., Ulanov A. Packet level simulation of cooperative distributed defense against Internet attacks // Proc. of the 16th Euromicro Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP 2008). Toulouse: IEEE Computer Society, 2008.
10. Mirkovic J., Robinson M., Reiher P., Oikonomou G. Distributed defense against DDOS attacks // Univ. of Delaware, CIS Department Technical Report. 2005. N 2.
11. Papadopoulos C., Lindell R., Mehringer I. et al. COSSACK: Coordinated suppression of simultaneous attacks // DISCEX — DARPA: Information Survivability Conference and Exposition. 2003.

#### Сведения об авторах

- Игорь Витальевич Котенко** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru
- Алексей Михайлович Коновалов** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: konovalov@comsec.spb.ru
- Андрей Владимирович Шоров** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: ashorov@comsec.spb.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

---

---

# СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОЦЕССОВ

---

---

УДК. 519.8

Э. А. Э. Дилоу-Рагиня, М. А. Колпин,  
К. Л. Григорьев, Б. В. Соколов

## ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДЕРНИЗАЦИИ УНАСЛЕДОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Приводится полимодельное описание процесса модернизации унаследованной информационной системы, которое предлагается использовать при многокритериальном оценивании экономической и технико-технологической эффективности создания и использования соответствующих информационных технологий.

*Ключевые слова:* динамические модели программного управления модернизацией, многокритериальное оценивание эффективности.

**Введение.** В настоящее время в условиях мирового финансового кризиса и острой конкурентной борьбы любые государственные и коммерческие организации стараются укрепить свои позиции на рынке, стремясь к улучшению качества предоставляемых товаров и услуг, внедряя инновации и повышая эффективность ведения бизнеса. Одним из важнейших факторов, существенно влияющих на успешное достижение вышеперечисленных целей, является тесная интеграция бизнес-систем (БС) с информационными технологиями и информационными ресурсами (ИТ и ИР), в том числе, и с корпоративными информационными системами (ИС). В этой связи особую актуальность приобретают вопросы оценивания экономической и технико-технологической эффективности внедрения (модернизации) ИТ и ИР применительно к каждой конкретной бизнес-системе или государственной организации [1].

В настоящей статье предлагается полимодельное описание процессов модернизации унаследованной информационной системы (УИС), которое можно использовать при решении широкого спектра задач многокритериального оценивания, анализа и выбора соответствующих программ модернизации. Под унаследованной информационной системой будем понимать ИС, для которой используется эволюционный путь развития: т.е. переход от их „старой“ архитектуры к „новой“ архитектуре осуществляется в течение определенных периодов времени и состоит в плановой замене отдельных подсистем и элементов функционирующей ИС в целях повышения производительности и снижения затрат на эксплуатацию. Данный этап жизненного цикла ИС называют этапом модернизации. Традиционно для принятия решения о проведении модернизации необходимо решить следующие задачи: создание облика модернизируемой ИС (поиск ответа на вопрос — что и когда надо модернизировать); определение срока (момента времени), к которому надо завершить модернизацию; создание технологии модернизации (поиск ответа на вопрос — в какой последовательности надо проводить модернизацию); разработка плана проведения модернизации.

Главное достоинство разрабатываемого подхода к формализации и решению перечисленных задач заключается в их интегративно-управленческо-стоимостной интерпретации, базирующейся на оригинальном сервис-ориентированном описании и соответствующих исследованиях. В рамках этих исследований на конструктивном уровне удастся одновременно зафиксировать в стоимостной форме объем услуг, оказываемых УИС бизнес-структурам на различных этапах их жизненного цикла, а каждую услугу (сервис) непосредственно связать с ИР, которые необходимы для ее реализации.

**Содержательная постановка задачи.** В основу построения полиmodelьного комплекса, предназначенного для описания процесса модернизации УИС, положим концепцию сервис-ориентированного подхода. Под сервисом ИТ будем понимать услугу, оказываемую УИС бизнес-процессу (БП) (бизнес-подразделению) с использованием соответствующих ИТ [1]. Сервис ИТ принято характеризовать следующими параметрами [1]:

- содержанием (функциональностью) — составом решаемых задач и набором средств для их решения;
- доступностью — периодом времени, в течение которого УИС поддерживает данный сервис;
- уровнем — периодом времени, в течение которого необходимо решать возникшую проблему;
- производительностью — объемом операций определенной категории в единицу времени;
- стоимостью сервиса для бизнес-подразделений.

В дальнейшем при построении конкретных моделей УИС постараемся учесть перечисленные параметры.

Основное достоинство сервис-ориентированного подхода состоит в том, что использование сервисов ИТ позволяет, с одной стороны, связать финансовые показатели, получаемые при реализации бизнес-продукта, с объемом услуг, предоставляемых данными сервисами, а с другой — на конструктивном уровне оценить потоки расходов, обусловленных разработкой, внедрением, сопровождением и эксплуатацией информационных ресурсов, являющихся материальной основой сервисов. Таким образом, определенный сервис (внешний и/или внутренний) оказывается своего рода „посредником“ между затратами ИР и объемом выпускаемой продукции (предоставленных услуг) на уровне конкретных БП. Это позволяет при финансовых расчетах отношение „многие ко многим“ (на уровне БП—ИР) заменить на два отношения „один ко многим“ (на уровнях БП—сервис (функция), сервис (функция)—ИР) [1].

На рис.1 для автоматизированной системы управления складом показан возможный вариант установления связи между БП, сервисами ИТ и ИР.

**Полиmodelьное описание процесса модернизации УИС.** Для проведения конкретных расчетов и оценивания взаимовлияния перечисленных концептов построим модели программного управления сервисами и информационными ресурсами при модернизации УИС. При этом данные модели будут обобщать ранее разработанные авторами модели, представленные в работах [2—7].

Описание предлагаемого полиmodelьного комплекса начнем с введения базисных множеств, с использованием которых будут построены конкретные модели. К указанным множествам относятся:  $A^{(0,j)} = \{A_v^{(0,j)}; v=1, \dots, n_j\}$  — множество БП, выполняемых в узле (подсистеме)  $B_j$  УИС;  $B = \{B_j; j=1, \dots, m\}$  — множество подсистем (узлов) УИС;  $B^{(v,j)} = \{B_r^{(v,j)}; r=1, \dots, \rho_v\}$  — множество ИР, модернизируемых в узле  $B_j$  и обеспечивающих реализацию БП  $A_v^{(0,j)}$ ;  $D^{(v)} = \{D_i^{(v)}; i=1, \dots, k_v\}$  — множество операций, входящих в БП  $A_v^{(0,j)}$  и выполняемых в узле  $B_j$  с использованием сервисов ИТ, предоставляемых УИС;

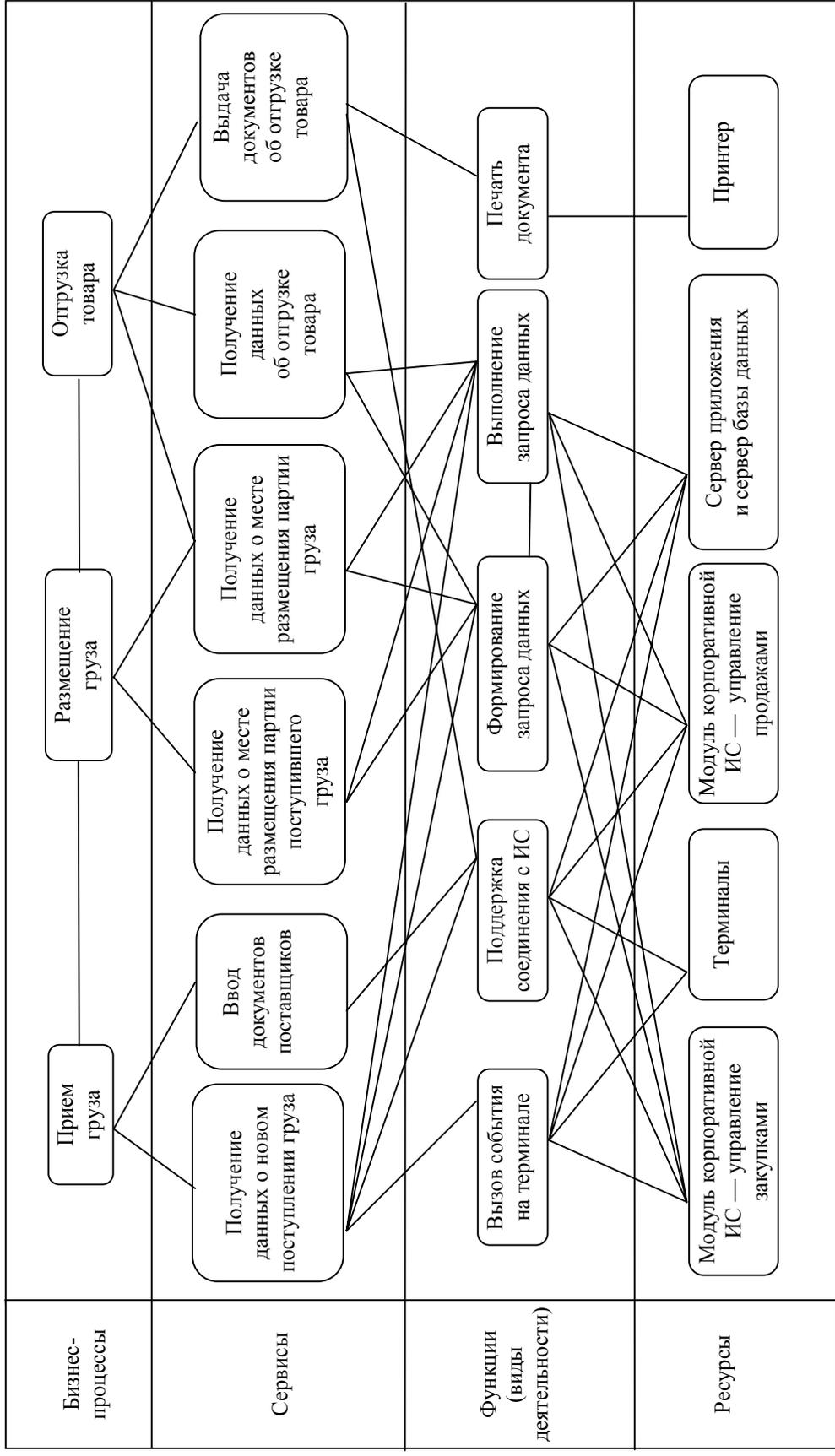


Рис. 1

$S^{(v)} = \{S_l^{(v)}; l=1, \dots, d_j\}$  — множество сервисов УИС, обеспечивающих выполнение операций  $D_i^{(v)}$ , входящих в БП  $A_v^{(0,j)}$ ;  $F^{(v,l)} = \{F_\chi^{(v,l)}; \chi=1, \dots, S_l\}$  — множество функций (видов деятельности), обеспечивающих реализацию сервисов  $S^{(v)}$ ;  $D_l^{(v,j)} = \{D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v,j)}; l=1, \dots, d_j, \chi=1, \dots, S_l\}$  — множество операций, обеспечивающих реализацию функции  $F_\chi^{(v,l)}$  и связанных со сбором, обработкой, хранением, передачей и защитой соответствующей информации и данных;  $D_r^{(p,j)} = \{D_{\langle r, k \rangle}^{(p,j)}; k=1, \dots, \lambda_j^{(r)}\}$  — множество операций, входящих в технологический цикл управления модернизацией ИР  $B_r^{(v,j)}$ .

Используя введенные множества, построим конкретные модели модернизации УИС.

Рассмотрим математическую модель программного управления сервисами ИТ, предоставляемыми УИС.

Математическая модель управляемых процессов представляется выражениями

$$\frac{dx_i^{(v,l)}}{dt} = \varepsilon_{il}(t)u_{il}^{(v)}(t); \quad (1)$$

$$\frac{dy_{il}^{(v)}}{dt} = \eta_{il}^{(v)}(t) \left[ 1 - \vartheta_{il}^{(v,1)} - u_{il}^{(v)} - \vartheta_{il}^{(v,2)} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{dx_{il}^{(v,1)}}{dt} = \vartheta_{il}^{(v,1)}, \quad \frac{dx_{il}^{(v,2)}}{dt} = \vartheta_{il}^{(v,2)}. \quad (3)$$

Ограничения, накладываемые на компоненты вектора состояний и управляющих воздействий, определяются следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{k_j} u_{il}^{(v)}(t) \leq g_l^{(v)} \quad \forall l; \quad \sum_{l=1}^{d_j} u_{il}^{(v)}(t) \leq h_i^{(v)} \quad \forall i; \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^{d_j} u_{il}^{(v)} \left[ \sum_{\alpha \in \Gamma_{v1}} (a_\alpha^{(v,l)} - x_\alpha^{(v,l)}) + \prod_{\beta \in \Gamma_{v2}} (a_\beta^{(v,l)} - x_\beta^{(v,l)}) \right] = 0 \quad \forall v; \quad (5)$$

$$\vartheta_{il}^{(v,1)} x_{il}^{(v,l)} = 0; \quad \vartheta_{il}^{(v,2)} (a_{il}^{(v,l)} - x_{il}^{(v,l)}) = 0 \quad \forall i, \forall l; \quad (6)$$

$$u_{il}^{(v)}(t) \in \{0, 1\}, \quad \vartheta_{il}^{(v)}(t) \in \{0, 1\}. \quad (7)$$

Краевые условия описываются выражениями

$$t = t_0^{(j)} : x_i^{(v)}(t_0^{(j)}) = y_{il}^{(v)}(t_0^{(j)}) = x_{il}^{(v)}(t_0^{(j)}) = 0; \quad (8)$$

$$t = t_f^{(j)} : x_i^{(v)}(t_f^{(j)}) = a_i^{(v)}; \quad y_l^{(v)}(t_f^{(j)}); \quad x_i^{(v)}(t_f^{(j)}) \in \mathbb{R}^1, \quad (9)$$

а показатели качества управления — соотношениями

$$J_1^{(v)} = \sum_{i=1}^{k_v} \sum_{l=1}^{d_j} y_{il}^{(v)}(t_f^{(j)}); \quad (10)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^{k_v} \sum_{l=1}^{d_j} \frac{1}{x_{il}^{(v,2)}(t_f^{(j)})} \int_{t_0^{(j)}}^{t_f^{(j)}} \vartheta_{il}^{(v,2)}(\tau) d\tau, \quad (11)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^{k_v} \sum_{l=1}^{d_j} \int_{t_0^{(j)}}^{t_f^{(j)}} [c_{il}^{(v,1)}(\tau) + c_{il}^{(v,2)}(\tau)] u_{il}^{(v)}(\tau) d\tau. \quad (12)$$

В соотношениях (1)—(12) переменные и константы интерпретируются следующим образом:  $x_i^{(v,l)}(t)$  — переменная, характеризующая состояние выполнения операции  $D_i^{(v)}$ ;  $a_i^{(v,l)}$  — заданная величина, характеризующая требуемый объем выполнения операции  $D_i^{(v)}$  с использованием сервиса  $S_l^{(v)}$ ;  $\varepsilon_{il}(t)$  — заданная функция времени, принимающая значение 1, если сервис  $S_l^{(v)}$  в момент времени  $t$  доступен для реализации операции  $D_i^{(v)}$ , и значение 0 — в противном случае;  $u_{il}^{(v)}(t)$  — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если на выполнение операции  $D_i^{(v)}$  в момент времени  $t$  выделен сервис  $S_l^{(v)}$ , в противном случае  $u_{il}^{(v)}(t)=0$ ;  $y_{il}^{(v)}$  — переменная, характеризующая текущие временные потери, вызванные прерыванием (невыполнением) операции  $D_i^{(v)}$  ввиду недоступности сервиса  $S_l^{(v)}$ ;  $\eta_{il}^{(v)}(t)$  — интенсивность материальных и временных потерь БП вследствие прерывания операции  $D_i^{(v)}$ , входящей в состав указанного процесса;  $\vartheta_{il}^{(v,1)}(t)$ ,  $\vartheta_{il}^{(v,2)}(t)$  — соответственно вспомогательные управляющие воздействия, принимающие значение 1, если операция  $D_i^{(v)}$  еще не начала выполняться либо операция  $D_i^{(v)}$  выполнена, в противном случае соответственно имеем  $\vartheta_{il}^{(v,1)}(t)=0$ ,  $\vartheta_{il}^{(v,2)}(t)=0$ ;  $x_{il}^{(v,1)}(t)$  — переменная, характеризующая текущее состояние первой вспомогательной операции: ее значение численно равняется временному интервалу от момента начала планирования  $t_0^{(j)}$  до момента начала выполнения операции  $D_i^{(v)}$ ;  $x_{il}^{(v,2)}(t)$  — переменная, характеризующая текущее состояние второй вспомогательной операции: ее значение численно равняется временному интервалу от момента окончания операции  $D_i^{(v)}$  до момента окончания планирования  $t_f^{(j)}$ ;  $a_\alpha^{(v,l)}$ ,  $a_\beta^{(v,l)}$  — заданные величины, характеризующие соответственно требуемые объемы выполнения операций  $D_\alpha^{(v)}$ ,  $D_\beta^{(v)}$ , которые непосредственно предшествуют операции  $D_i^{(v)}$ ;  $g_l^{(v)}$  — заданная величина, определяющая количество операций  $D_i^{(v)}$ , которые одновременно могут обслуживаться сервисом  $S_l^{(v)}$ ;  $h_i^{(v)}$  — заданная величина, определяющая количество сервисов  $S_l^{(v)}$ , которые одновременно могут использоваться при выполнении операции  $D_i^{(v)}$ ;  $c_{il}^{(v,1)}(t)$ ,  $c_{il}^{(v,2)}(t)$  — известные функции времени, с помощью которых соответственно задаются текущие капитальные и эксплуатационные расходы, связанные с созданием и применением сервиса  $S_l^{(v)}$ , используемого при выполнении операции  $D_i^{(v)}$ .

Ограничения вида (4) определяют возможности по одновременному использованию сервиса  $S_l^{(v)}$  при выполнении  $g_l^{(v)}$  операций  $D_i^{(v)}$  и соответственно возможности параллельного использования  $h_i^{(v)}$  сервисов  $S_l^{(v)}$  при выполнении операции  $D_i^{(v)}$ . Ограничения вида (5) определяют очередность выполнения операций  $D_i^{(v)}$ , входящих в состав БП, обслуживаемого рассматриваемой УИС, при этом  $\Gamma_{v1}$ ,  $\Gamma_{v2}$  — множества номеров операций  $D_\alpha^{(v)}$  и  $D_\beta^{(v)}$ , непосредственно предшествующих операциям  $D_i^{(v)}$  и связанных с ней соответственно логическими операциями И и ИЛИ; ограничения (6) определяют условия начала выполнения вспомо-

могательных операций, процесс выполнения которых описывается соотношениями (3). Ограничения (7) задают область изменения возможных значений управляющих воздействий  $u_{il}^{(v)}(t)$ ,  $\vartheta_{il}^{(v)}(t)$ . Соотношения (8), (9) задают ограничения на значения переменных  $x_i^{(v)}(t)$ ,  $y_{il}^{(v)}(t)$ ,  $x_{il}^{(v)}(t)$  в моменты времени  $t_0^{(j)}$  и  $t_f^{(j)}$ , определяющие начало и окончание временного интервала, на котором осуществляется модернизация УИС.

На рис. 2 проиллюстрирована динамика взаимодействия основных и вспомогательных операций и управляющих воздействий в соответствии с соотношениями (1)—(7).

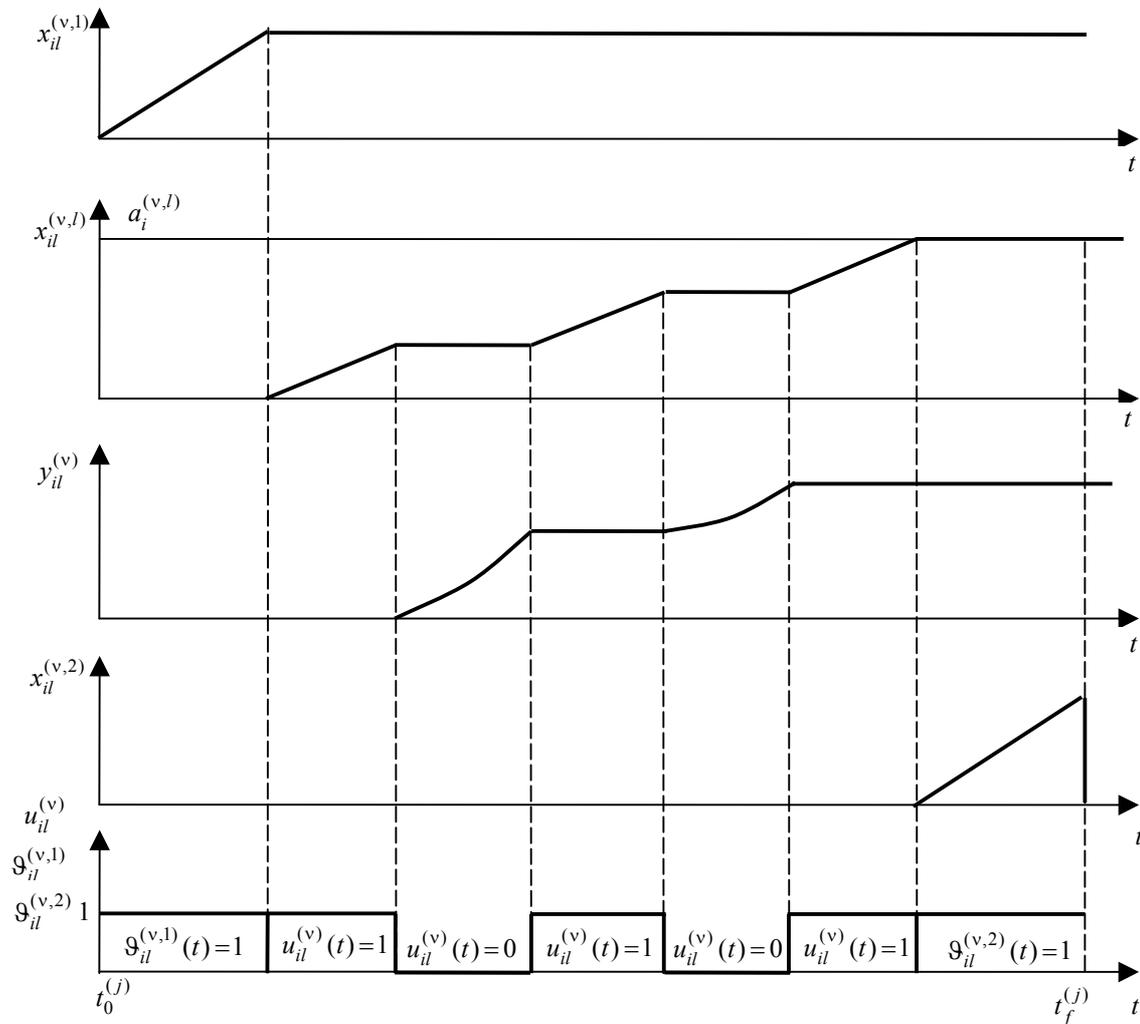


Рис. 2

Показатель качества процесса программного управления (планирования) модернизацией вида (10) позволяет оценить суммарные потери от простаивания сервисов  $S_i^{(v)}$ , выделяемых на выполнение операций  $D_i^{(v)}$ . Интегральный показатель качества управления вида (11) позволяет оценить в момент времени  $t=t_f^{(j)}$  общее число выполненных операций  $D_i^{(v)}$ , входящих в состав БП. С помощью критериальной функции вида (12) можно провести оценивание суммарных капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с созданием, внедрением, сопровождением и эксплуатацией сервисов  $S_i^{(v)}$ , выделяемых модернизируемой УИС для выполнения операций  $D_i^{(v)}$ .

Перейдем к рассмотрению второй модели, входящей в состав предлагаемого полимодельного комплекса, а именно *динамической модели программного управления функционированием элементов и подсистем УИС, располагаемых в ее узле  $V_j$* .

Математическая модель управляемых процессов представляется выражениями

$$\frac{dx_{\chi}^{(v,l)}}{dt} = \sum_{r=1}^{\rho_v} u_{\chi r}^{(v,l)}; \quad \frac{dx_r^{(v,l)}}{dt} = \sum_{\chi=1}^{S_l} w_{\chi r}^{(v,l)}; \quad \frac{dx_{rS_l}^{(v,l)}}{dt} = \omega_{rS_l}^{(v,l)}. \quad (13)$$

Ограничения на управляющие воздействия определяются следующим образом:

$$0 \leq u_{\chi r}^{(v,l)} \leq \left[ e_{\chi r}^{(j)} (1 - \vartheta_r^{(p,2)}(t)) + \bar{e}_{\chi r}^{(j)} \vartheta_r^{(p,2)}(t) \right] w_{\chi r}^{(v,l)}; \quad (14)$$

$$\sum_{v=1}^{n_j} \sum_{\chi=1}^{S_v} V_{\chi}^{(v)} w_{\chi r}^{(v,l)} \leq \left[ V_r^{(j)} (1 - \vartheta_r^{(p,2)}(t)) + \bar{V}_r^{(j)} \vartheta_r^{(p,2)}(t) \right] \xi_r^{(j,1)}; \quad (15)$$

$$\sum_{v=1}^{n_j} \sum_{\chi=1}^{S_v} u_{\chi r}^{(v,l)}(t) \leq \left[ \Phi_r^{(j)} (1 - \vartheta_r^{(p,2)}(t)) + \bar{\Phi}_r^{(j)} \vartheta_r^{(p,2)}(t) \right] \xi_r^{(j,2)}; \quad (16)$$

$$\sum_{r=1}^{\rho_v} w_{\chi r}^{(v,l)} \left[ \sum_{\xi \in \Gamma_{v3}} (a_{\xi}^{(v,l)} - x_{\xi}^{(v,l)}) + \prod_{\mu \in \Gamma_{v4}} (a_{\mu}^{(v,l)} - x_{\mu}^{(v,l)}) \right] = 0; \quad (17)$$

$$\sum_{r=1}^{\rho_v} w_{\chi r}^{(v,l)}(t) \leq \psi_{\chi} \quad \forall \chi; \quad \sum_{\chi=1}^{S_l} w_{\chi r}^{(v,l)}(t) \leq \varphi_r \quad \forall r; \quad (18)$$

$$\omega_{rS_l}^{(v,l)} (a_{S_l}^{(v,l)} - x_{S_l}^{(v,l)}) = 0; \quad (19)$$

$$w_{\chi r}^{(v,l)} \in \{0, u_{il}^{(v)}\}; \quad \vartheta_r^{(p,2)}(t), \omega_{rS_l}^{(v,l)} \in \{0, 1\}; \quad \xi_r^{(j,1)}(t); \xi_r^{(j,2)}(t) \in [0, 1]. \quad (20)$$

Краевые условия описываются выражениями

$$t = t_0^{(j)} : x_{\chi}^{(v,l)}(t_0^{(j)}) = x_r^{(v,l)}(t_0^{(j)}) = x_{rS_l}^{(v,l)}(t_0^{(j)}) = 0; \quad (21)$$

$$t = t_f^{(j)} : x_{\chi}^{(v,l)}(t_f^{(j)}) = a_{\chi}^{(v,l)}; \quad x_r^{(v,l)}(t_f^{(j)}); \quad x_{rS_l}^{(v,l)}(t_f^{(j)}) \in \mathbb{R}^1, \quad (22)$$

а показатели качества управления — соотношениями

$$J_4 = \sum_{r=1}^{\rho_v-1} \sum_{r_1=r+1}^{\rho_v} \int_{t_0^{(j)}}^{t_f^{(j)}} (x_r^{(v,l)}(\tau) - x_{r_1}^{(v,l)}(\tau)) d\tau; \quad (23)$$

$$J_5 = \sum_{r=1}^{\rho_v} \sum_{\chi=1}^{S_l} \int_{t_0^{(j)}}^{t_f^{(j)}} \delta_{\chi r}^{(v,l)}(\tau) w_{\chi r}^{(v,l)}(\tau) d\tau; \quad (24)$$

$$J_6 = \frac{1}{2} \sum_{\chi=1}^{S_l} (a_{\chi}^{(v,l)} - x_{\chi}^{(v,l)}(t_f^{(j)}))^2, \quad (25)$$

$$J_7 = \sum_{\chi=1}^{S_l} \sum_{r=1}^{\rho_v} \int_{t_0^{(j)}}^{t_f^{(j)}} [c_{\chi r}^{(l,1)}(\tau) + c_{\chi r}^{(l,2)}(\tau)] w_{\chi r}^{(v,l)}(\tau) d\tau. \quad (26)$$

В соотношениях (13)—(26) переменные, с учетом обозначений, принятых в работе [4], интерпретируются следующим образом:  $x_{\chi}^{(v,l)}$  — переменная, характеризующая состояние

выполнения операции  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$  [т.е. текущий объем обработанной (либо переданной, либо анализируемой, хранимой, отображаемой и т.п.) информации (либо данных)];  $a_{\chi}^{(v, l)}$  — заданный объем информации (данных), который необходимо обработать в ходе реализации функции  $F_{\chi}^{(v, l)}$  (внутреннего сервиса) УИС;  $x_r^{(v, l)}$  — переменная, текущее значение которой численно равно общей продолжительности использования ИР  $B_r^{(v, j)}$ , входящего в состав узла  $B_j$  УИС;  $u_{\chi r}^{(v, l)}(t)$  — интенсивность обработки на ИР  $B_r^{(v, j)}$  информации, необходимой для выполнения операции  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$ , обеспечивающей реализацию функции (внутреннего сервиса)  $F_{\chi}^{(v, l)}$ ;  $w_{\chi r}^{(v, l)}$  — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если ИР  $B_r^{(v, j)}$  выделяется для выполнения операции  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$ , в противном случае  $w_{\chi r}^{(v, l)}(t)=0$ ;  $e_{\chi r}^{(j)}$ ,  $V_r^{(j)}$ ,  $\Phi_r^{(j)}$  — заданные величины, характеризующие соответственно максимально возможную интенсивность выполнения операции  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$  на ресурсе  $B_r^{(v, j)}$ , максимально возможный объем доступной оперативной памяти и производительность УИС в узле  $B_j$  до его модернизации;  $\bar{e}_r^{(j)}$ ,  $\bar{V}_r^{(j)}$ ,  $\bar{\Phi}_r^{(j)}$  — величины, имеющие аналогичную интерпретацию, но соответствующие ситуациям, когда модернизация (либо восстановление работоспособности) проведена;  $x_{rS_l}^{(v, l)}(t)$  — вспомогательная переменная, значение которой численно равняется временному интервалу от момента окончания операции  $D_{\langle l, S_l \rangle}^{(v, j)}$  до текущего момента времени  $t$ ;  $\omega_{rS_l}^{(v, l)}(t)$  — вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1, если операция  $D_{\langle l, S_l \rangle}^{(v, j)}$  завершена или, другими словами, полностью выполнена технология обработки информации для реализации функции  $F_{\chi}^{(v, l)}$ , в противном случае  $\omega_{rS_l}^{(v, l)}(t)=0$ ;  $\mathfrak{g}_r^{(p, 2)}(t)$  — вспомогательное управляющее воздействие, принимающее значение 1 в момент времени  $t$ , если осуществлен переход от „прежних“ параметров ИР ( $e_{\chi r}^{(j)}$ ,  $V_r^{(j)}$ ,  $\Phi_r^{(j)}$ ) к „новым“ параметрам ИР ( $\bar{e}_r^{(j)}$ ,  $\bar{V}_r^{(j)}$ ,  $\bar{\Phi}_r^{(j)}$ ) в узле  $B_j$ ;  $V_{\chi}^{(v)}$  — объем оперативной памяти, которая выделяется для выполнения операции  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$ ;  $\delta_{\chi r}^{(v, l)}(\tau)$  — заданная функция, определяющая качество выполнения соответствующей операции;  $c_{\chi r}^{(l, 1)}(\tau)$ ,  $c_{\chi r}^{(l, 2)}(\tau)$  — известные функции времени, с помощью которых соответственно задаются текущие капитальные и эксплуатационные расходы, связанные с созданием и использованием ИР  $B_r^{(v, j)}$ , необходимого при выполнении операций  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v, j)}$  для реализации функции  $F_{\chi}^{(v, l)}$  (внутреннего сервиса) рассматриваемой УИС.

С помощью функций  $0 \leq \xi_r^{(j, 1)}(t) \leq 1$  и  $0 \leq \xi_r^{(j, 2)}(t) \leq 1$  в предлагаемых моделях можно задать интервальные возмущающие воздействия на параметры существующих и модернизируемых ИР вида  $B_r^{(v, j)}$ . Ограничения (14)—(16) определяют возможности по обработке информации на ресурсе  $B_r^{(v, j)}$  до и после модернизации. Ограничения (17) определяют очередность выполнения операций, связанных с обработкой информации. Их интерпретация подобна интерпретации ограничений вида (5), но применительно к рассматриваемому типу операций. Ограничения вида (18), так же как и ограничения вида (4), определяют возможность

одновременного использования нескольких ресурсов для выполнения некоторой фиксированной функции и, напротив, использования одного ресурса для одновременного выполнения нескольких функций (предполагается, что  $\psi_\chi$  и  $\varphi_r$  — известные числа); с помощью соотношений (21) и (22) задаются значения переменных  $x_\chi^{(v,l)}(t)$ ,  $x_r^{(v,l)}(t)$ ,  $x_{rS_l}^{(v,l)}(t)$  в начальный и конечный моменты времени. Показатель качества вида (23) предназначен для оценивания степени равномерности использования ИР  $B_r^{(v,j)}$  и  $B_{r_1}^{(v,j)}$ ,  $r, r_1 \in \{1, \dots, \rho_v\}$ . Критериальная функция вида (24) позволяет оценить суммарное качество выполнения всех операций  $D_{\langle l, \chi \rangle}^{(v,j)}$ . Показатели вида (25) вводятся в том случае, если необходимо оценить точность выполнения краевых условий (22) либо минимизировать потери, вызванные невыполнением соответствующих операций. С помощью критериальной функции вида (26) можно оценить суммарные капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с созданием, внедрением, сопровождением и эксплуатацией ИР  $B_r^{(v,j)}$ .

**Обсуждение полученных результатов.** Разработанный полимодельный комплекс (см. формулы (1)—(26)), включающий в себя динамические модели программного управления сервисами ИТ, предоставляемыми УИС, и модели программного управления функционированием элементов и подсистем УИС, располагаемых в ее узле  $B_j$ , должен быть дополнен еще целым рядом моделей [2—4, 6]: динамическими моделями управления собственно процессами модернизации УИС, моделями параметрической и структурной адаптации всех перечисленных моделей, отдельные параметры которых представлены в соотношениях (1)—(26). Так, например, с помощью управляющих воздействий  $\mathcal{G}_r^{(p,2)}(t)$  (см. соотношения (14)—(16)) задаются возможные программы управления модернизацией УИС, а возмущающие воздействия вида  $\xi_{\zeta_r}^{(j,1)}(t)$ ,  $\xi_{\zeta_r}^{(j,2)}(t)$  используются при оценивании робастности сформированных программ функционирования и модернизации, что более подробно описано в работах [6, 7].

Кратко остановимся на том, как построенные динамические модели взаимодействуют друг с другом. Указанные механизмы (алгоритмы, процедуры, методики) обеспечивают необходимую координацию моделей в рамках разработанного полимодельного комплекса [1—26]. Ранее отмечалось, что взаимодействие моделей управления функционированием элементов и подсистем УИС осуществляется в рамках смешанных ограничений вида (6). В свою очередь, модель программного управления сервисами ИТ влияет на модель (13)—(26) посредством ограничений вида (14) и (20).

На основе соотношений (1)—(26) с дополнительным использованием моделей, представленных в работах [4, 6], можно корректно с формальной точки зрения сформулировать и решить ряд интересных и актуальных научно-практических задач анализа и синтеза программ создания и развития УИС в различных условиях изменения внешней обстановки. Основное достоинство предлагаемого полимодельного многокритериального описания рассматриваемой предметной области состоит в том, что разработка конкретных методов, алгоритмов и методик создания и применения унаследованных информационных систем базируется на использовании фундаментальных и прикладных результатов, полученных к настоящему времени в современной теории управления, в исследовании операций, теории принятия решений и теории систем [6].

Междисциплинарные исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 10-08-90027, 09-07-00066, 08-08-00403, 09-07-11004) и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипкин К. Г. Экономическая эффективность информационных систем. М.: ДМК Пресс, 2002. 256 с.
2. Соколов Б. В., Охтилев М. Ю., Петрова И. А., Иконникова А. В. Модели и алгоритмы комплексного планирования процессов модернизации и функционирования катастрофоустойчивых информационных систем // Тр. IV Междунар. конф. „Параллельные вычисления и задачи управления“ (РАСО'2008), Москва, 27—29 окт. 2008 г. М.: ИПУ РАН, 2008; [Электронный ресурс]: <www.pasco.sicpro.org>.
3. Соколов Б. В., Зайчик Е. М., Охтилев М. Ю., Тарасов О. М. Комбинированные модели и алгоритмы многокритериального выбора структуры технической системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 10—15.
4. Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Там же. 2008. Т. 51, № 11. С. 62—69.
5. Соколов Б. В., Потрясаев С. А., Иконникова А. В., Иванов Д. А. Модель и алгоритм оперативного перераспределения функций управления между узлами катастрофоустойчивой информационной системы // Тр. Междунар. науч. школы „Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах (МА БР—2007)“, Санкт-Петербург, 4—8 сент. 2007 г. СПб: СПб ГУАП, 2007. С. 440—445.
6. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
7. Ivanov D., Sokolov B. Adaptive Supply Chain Management. London — Dordrech — Heidelberg — New York: Springer, 2010. 269 p.

**Сведения об авторах**

- Эвелио Антонио Эвелиевич Дилоу-Рагиня** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании
- Михаил Александрович Колпин** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космическими аппаратами, Санкт-Петербург; E-mail: kolpin-ma@mail.ru
- Кирилл Леонидович Григорьев** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизации систем управления, Санкт-Петербург; преподаватель
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научным вопросам; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ, Е. Г. ЦИВИРКО, А. В. ЧУКАРИН

## МЕТОД МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА В ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ

Приведена математическая модель задачи управления сетевым трафиком при наличии разнородных требований к маршрутизации и совместном применении различных алгоритмов нахождения маршрута. Предложен метод управления маршрутизацией трафика для гетерогенной информационно-коммуникационной сети произвольной структуры, позволяющий максимально эффективно использовать ресурсы сети, уменьшая количество блокировок и задержек трафика.

**Ключевые слова:** маршрутизация, управление трафиком, планирование ресурсов, управление информационными коммуникациями.

**Введение.** Методология управления трафиком в информационно-коммуникационных сетях включает в общем случае три составляющие — алгоритмы маршрутизации, правила сетевого планирования и правила последующей оптимизации сети.

Алгоритмы маршрутизации ориентированы на конкретный тип сети связи, их целью является эффективное использование существующих ресурсов сети. Сетевое планирование предполагает изменения в архитектуре сети (ее топологии и пропускной способности звеньев) в целях повышения ее работоспособности, адаптивности и простоты использования. В свою очередь, к оптимизации сети относится непосредственно распределение трафика по сети для исключения его блокировок и уменьшения задержек, во избежание перенасыщения звеньев сети, а также для выполнения всех требований к передаче потока информации.

В настоящее время существует большое количество алгоритмов маршрутизации, удовлетворяющих требованиям к передаче трафика, к параметрам качества обслуживания (Quality of Service — QoS), соглашениям об уровне обслуживания (Service Level Agreements — SLA) и др. [1—5]. При этом практически отсутствуют работы, посвященные анализу возможностей совместного использования различных алгоритмов маршрутизации при реализации механизма разделения трафика. В настоящей статье рассматривается метод решения задачи маршрутизации для современных информационно-коммуникационных сетей, построенных на базе семейства протоколов MPLS [2—4, 6—8], описан и формализован подход к разделению трафика и управлению им.

**Постановка задачи.** Рассмотрим информационно-коммуникационную сеть и соответствующий ей ориентированный граф  $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , где  $\mathcal{V}$  — множество вершин,  $\mathcal{E}$  — множество дуг. Пусть  $\mathcal{V}_1$  — множество граничных маршрутизаторов,  $\mathcal{V}_2$  — множество транзитных маршрутизаторов и  $\mathcal{V} = \mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2$ .

Определим множество  $\mathcal{R}$ , такое что  $\mathcal{R} \subset \mathcal{V}_1 \times \mathcal{V}_1$ . Пары вершин из множества  $\mathcal{R}$  соответствуют парам тех конечных узлов сети, между которыми осуществляется передача трафика.

Для  $\forall (v_i, v_j) \in \mathcal{R}$  определим множество маршрутов  $\mathcal{L}(v_i, v_j) = \{l_1(v_i, v_j), l_2(v_i, v_j), \dots, l_n(v_i, v_j)\}$  из вершины  $v_i$  в вершину  $v_j$ , где  $l_*(v_i, v_j) = \{v_i, v_{i+1}, v_{i+2}, \dots, v_{j-1}, v_j\}$  — некоторый маршрут из вершины  $v_i$  в  $v_j$ .

Для каждой пары  $(v_i, v_j) \in \mathcal{R}$  определим функцию  $f(v_i, v_j) \geq 0$ , соответствующую объему трафика, передаваемого между вершинами  $v_i$  и  $v_j$ , и удовлетворяющую условиям

$$\sum_{\forall v_k: (v_i, v_k) \in \mathcal{E}} f_{(v_i, v_j)}(v_i, v_k) = \sum_{\forall v_l: (v_l, v_j) \in \mathcal{E}} f_{(v_i, v_j)}(v_l, v_j) = f(v_i, v_j) \forall v_k, v_l \in \mathcal{V} \setminus \{v_i, v_j\}; \quad (1)$$

$$f_{(v_i, v_j)}(v_k, v_l) \leq w(v_k, v_l) - \sum_{(v_m, v_n) \in \mathcal{R} \setminus (v_i, v_j)} f_{(v_m, v_n)}(v_k, v_l), \quad (2)$$

где  $f_{(v_i, v_j)}(v_k, v_l)$  — доля потока  $f(v_i, v_j)$ , протекающего по дуге  $(v_k, v_l)$ ;  $w(v_k, v_l) = w_{kl} \geq 0$  — пропускная способность (вес) дуги  $(v_k, v_l)$ .

Условие (1) определяет гарантии того, что объем трафика, передаваемого по сети из вершины  $v_i$ , будет равен объему трафика, поступающего в вершину  $v_j$ , иными словами, при маршрутизации потока какая-либо его часть не будет утеряна. Условие (2) означает, что объем трафика, передаваемого по какой-либо дуге, не превышает остаточного веса этой дуги.

Сеть будем определять как орграф, каждой дуге  $(v_k, v_l)$  которого приписана тройка:  $(w_{kl}, \text{cost}_{kl}, f_{kl})$ , где  $\text{cost}_{kl} = \text{cost}(v_k, v_l) \geq 0$  — функция стоимости передачи единицы (бита, байта и т.п.) трафика по дуге  $(v_k, v_l)$ ,  $f_{kl} = f_{(v_k, v_l)}^{\text{all}} \geq 0$  — функция, соответствующая общему объему трафика, передаваемого по дуге  $(v_k, v_l)$  в данный момент времени. Будем при этом считать, что значение  $\text{cost}(v_k, v_l)$  одинаково при передаче потока в обе стороны (т.е. стоимость передачи по звену сети в прямом направлении равна стоимости передачи по этому звену в обратном направлении).

Стоимостью передачи пакета данных для пары  $(v_i, v_j) \in \mathcal{R}$  будем считать величину  $\text{cost}'(v_i, v_j) = \sum_{(v_k, v_l) \in l_r(v_i, v_j)} f_{(v_i, v_j)}(v_k, v_l) \text{cost}(v_k, v_l)$ , где  $l_r(v_i, v_j) \in \mathcal{L}(v_i, v_j)$ .

Остаточной пропускной способностью дуги  $(v_k, v_l)$  назовем величину  $w'(v_k, v_l) = w(v_k, v_l) - \sum_{(v_i, v_j) \in \mathcal{R}} f_{(v_i, v_j)}(v_k, v_l)$ , которая показывает, на какое значение может быть увеличен поток по дуге  $(v_k, v_l)$  без превышения пропускной способности. При этом в графовой модели сети вместо тройки  $(w_{kl}, \text{cost}_{kl}, f_{kl})$  можно использовать пару  $(w'_{kl}, \text{cost}_{kl})$ , где  $w'_{kl} = w_{kl} - f_{kl}$ .

Остаточной пропускной способностью дуги  $(v_k, v_l)$  для трафика типа  $g = \overline{1, n}$  назовем величину  $w'_g(v_k, v_l) = w(v_k, v_l) - \sum_{(v_n, v_m) \in \mathcal{R}} f_{(v_n, v_m)}^g(v_k, v_l)$ , где  $f_{(v_n, v_m)}^g(v_k, v_l)$  — доля трафика типа  $g$ , проходящего по дуге  $(v_k, v_l)$ .

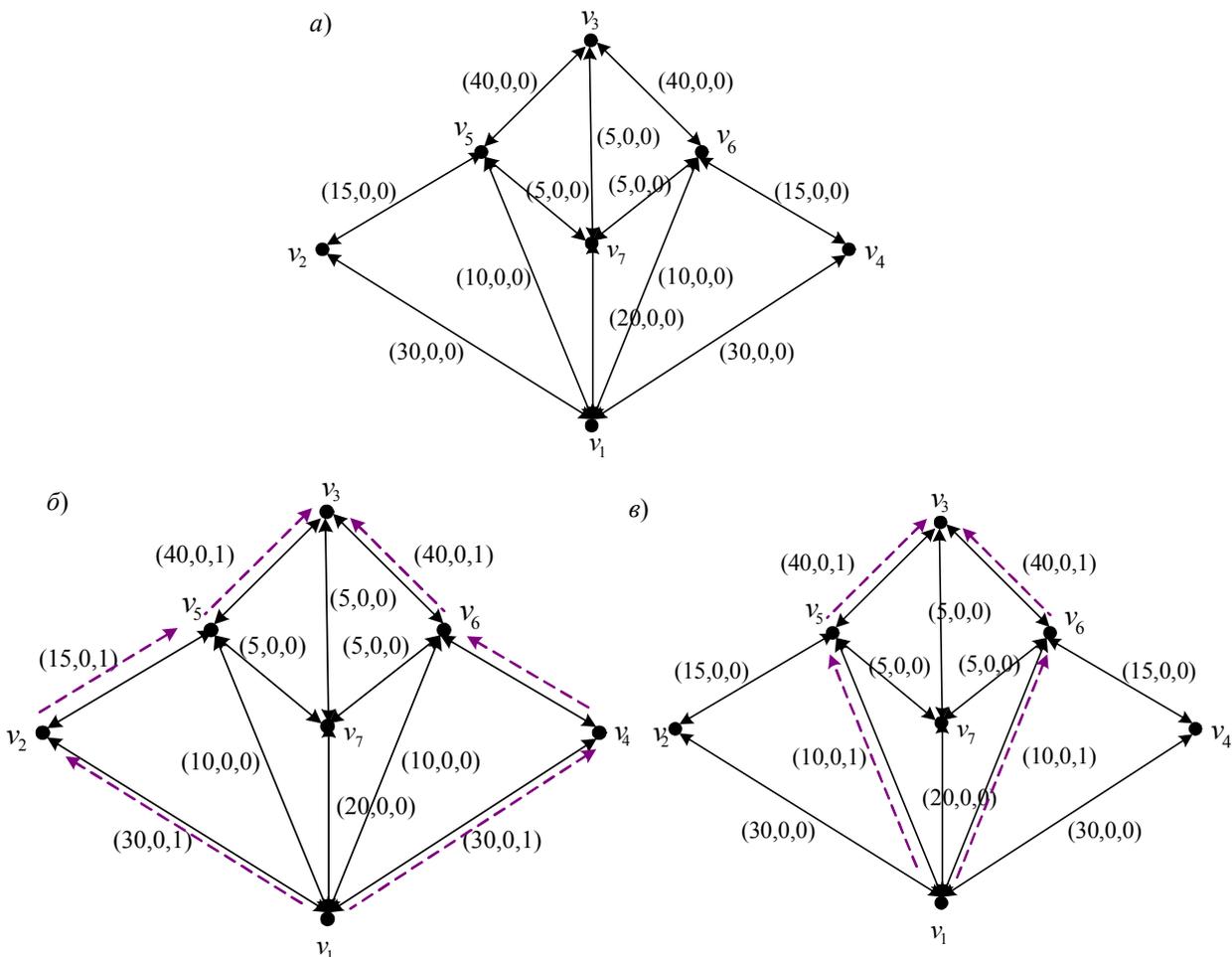
Введем множество  $\mathcal{Q} = \{q_1, \dots, q_n\}$  всех параметров качества обслуживания (QoS), где каждому из  $q_i$  соответствует свой параметр QoS, например:  $q_1 = \{\text{ограничение на количество транзитных маршрутизаторов}\}$ ;  $q_2 = \{\text{ограничение на стоимость передачи потока}\}$ ;  $q_3 = \{\text{гарантированность доставки трафика}\}$ ;  $q_4 = \{\text{ограничение на время передачи}\}$  и др.

Запрос на маршрутизацию потока представим следующим образом:  $(\text{id}_i, v_k, v_l, f(v_k, v_l), q_j, \text{pr})$ , где  $\text{id}_i$  — идентификатор запроса;  $v_k$  — источник;  $v_l$  — сток;

$f(v_k, v_l)$  — объем передаваемого трафика (требуемая ширина полосы пропускания);  $q_j$  — параметр множества  $\mathcal{Q}$ , установленный для заданного запроса;  $pr$  — приоритет, присваиваемый передаваемому трафику и принимающий два значения: *high* — для трафика с высоким приоритетом и *normal* — для остального трафика.

В общем случае постановка задачи формулируется следующим образом. В сеть поступает запрос на маршрутизацию потока  $(id_i, s, t, f(s, t), q_i, pr)$ . Требуется найти наилучший маршрут для этого потока с учетом существующей топологии сети, нагрузки, уже обслуживаемой сетью, параметров качества обслуживания, а также возможности разделения трафика для обеспечения его передачи.

Проиллюстрируем постановку задачи на примере орграфа сети (см. рисунок, а). Поступает запрос на маршрутизацию потока  $(id_1, v_1, v_3, 2, \emptyset, normal)$  из вершины  $v_1$  в вершину  $v_3$  с требованием о наличии доступной полосы пропускания, позволяющей одновременно пропускать две единицы трафика. Для поступившего запроса отсутствуют требования к параметрам множества  $\mathcal{Q}$ . Необходимо определить лучший путь для этого потока. Наилучшим для рассматриваемого примера будет кратчайший маршрут без повышенного приоритета трафика с возможностью его разделения. В таком — простейшем — случае можно предложить целый ряд решений, два из которых показаны на рисунке, б, в. Для выбора же единственного корректного маршрута необходима разработка метода, позволяющего получить обоснованные точные решения для сети с произвольной структурой и большим числом дополнительных параметров.



К частным алгоритмам, которые позволяют учитывать топологию сети, ее текущую нагрузку и пропускную способность звеньев, относятся такие алгоритмы, как Minimum Interference Algorithm (MIRA) [6], Profile-Based Routing (PBR) [3], Dynamic Online Routing

Algorithm (DORA) [1, 2, 7] и Virtual Flow Deviation (VFD) [4, 9]. Каждый из перечисленных алгоритмов является лучшим в своем классе, но ориентирован на применение для определенного типа топологий сети или для определенного набора параметров качества обслуживания. В настоящей статье предложен универсальный метод маршрутизации, для которого будет возможно применение как известных алгоритмов по отдельности, так и их адаптация для совместного применения при построении маршрутов в связанной сети с произвольно заданными топологией и параметрами качества обслуживания, а также с заданной стоимостью передачи трафика и возможностью его разделения.

**Метод решения задачи управления маршрутизацией.** Рассмотрим метод решения задачи маршрутизации, обеспечивающий точное решение задачи управления трафиком в информационно-коммуникационной транспортной сети, удовлетворяющее сформулированным ниже условиям и требованиям.

*Условия маршрутизации потоков.*

1. Будем рассматривать задачу маршрутизации с разделением трафика в предположении, что маршрутизация потока может осуществляться одновременно по разным путям.

2. Трафик может передаваться как через ядро сети, так и через оконечные узлы.

3. При маршрутизации потоков будем использовать основные алгоритмы маршрутизации: MIRA, DORA и VFD.

4. Если существуют альтернативные маршруты, то при делении потока маршрутизация его составляющих осуществляется по непересекающимся путям; в случае если таковых не существует, то по любым из найденных путей.

5. Все поступающие потоки рассматриваются в следующем порядке: в первую очередь, без учета значений  $q_i$ , осуществляется поиск маршрута, затем при наличии нескольких маршрутов выбирается тот, который удовлетворяет требованиям к передаче. В случае если найден только один маршрут, осуществляется проверка на его соответствие этим требованиям, в противном случае поиск маршрута проводится повторно.

*Ограничения на стоимость передачи трафика.*

1. Если найденный путь для потока, имеющего наименьшую стоимость передачи, совпадает (или пересекается) с маршрутом потока, имеющим бóльшую стоимость, то последний блокируется лишь в том случае, если остаточная пропускная способность дуг орграфа, принадлежащих общей части маршрутов, не удовлетворяет суммарному объему обоих потоков: т.е. передаваться будет поток, имеющий наименьшую стоимость.

Иными словами, пусть осуществляется передача потока  $(id_1, v_k, v_l, f(v_k, v_l), q_i, pr)$  стоимостью  $cost'(v_k, v_l) = \sum_{(v_i, v_j) \in l(v_k, v_l)} cost(v_i, v_j)$  по пути  $l(v_k, v_l) = \{v_k, v_{k+1}, \dots, v_i, v_j, \dots, v_l\}$ .

Поступает запрос на маршрутизацию второго потока  $(id_2, v_s, v_d, f(v_s, v_d), q_i, pr)$  с тем же приоритетом, что и первый. Маршрутизация потока осуществляется по пути  $l(v_s, v_d) = \{v_s, v_{s+1}, \dots, v_i, v_j, \dots, v_d\}$ , причем  $cost'(v_s, v_d) < cost'(v_k, v_l) = \sum_{(v_i, v_j) \in l(v_s, v_d)} cost(v_i, v_j)$ .

Тогда поток  $(id_1, v_k, v_l, f(v_k, v_l), q_i, pr)$  блокируется, если  $f(v_k, v_l) + f(v_s, v_d) > w'(v_i, v_j)$  для какой-либо дуги  $(v_i, v_j) \in l(v_k, v_l)$  и  $(v_i, v_j) \in l(v_s, v_d)$ .

2. При выполнении п. 1 и в случае передачи трафика с возможностью повторной маршрутизации поток, имеющий бóльшую стоимость, перенаправляется по другому, альтернативному пути.

3. При существовании альтернативных путей для потоков, имеющих одинаковую стоимость передачи, выбирается тот маршрут, количество транзитных узлов на котором наименьшее.

*Требования к приоритету.*

1. Если поступает запрос на маршрутизацию потока с наивысшим приоритетом ( $pr = high$ ), то поиск маршрута осуществляется без учета существующих потоков на орграфе сети.

2. Для потоков с меньшим приоритетом ( $pr = normal$ ) поиск маршрута осуществляется с учетом всех существующих потоков на орграфе сети.

3. Если найденный путь для потока с наивысшим приоритетом совпадает (или пересекается) с маршрутом потока, имеющего меньший приоритет, то последний блокируется лишь в том случае, если остаточная пропускная способность дуг орграфа, принадлежащих общей части маршрутов, не удовлетворяет суммарному объему обоих потоков: т.е. передаваться будет поток с наивысшим приоритетом.

Иными словами, пусть осуществляется передача потока  $(id_1, v_k, v_l, f(v_k, v_l), q_i, normal)$  по пути  $l(v_k, v_l) = \{v_k, v_{k+1}, \dots, v_i, v_j, \dots, v_l\}$ . Поступает запрос на маршрутизацию второго потока  $(id_2, v_s, v_d, f(v_s, v_d), q_i, high)$ . Маршрутизация потока осуществляется по пути  $l(v_s, v_d) = \{v_s, v_{s+1}, \dots, v_i, v_j, \dots, v_d\}$ . Тогда поток  $(id_1, v_k, v_l, f(v_k, v_l), q_i, normal)$  блокируется, если  $f(v_k, v_l) + f(v_s, v_d) > w'(v_i, v_j)$  для какой-либо дуги  $(v_i, v_j) \in l(v_k, v_l)$  и  $(v_i, v_j) \in l(v_s, v_d)$ .

4. При выполнении предыдущего пункта и в случае передачи трафика с возможностью повторной маршрутизации поток с меньшим приоритетом перенаправляется по другому, альтернативному пути.

5. Если одновременно поступают несколько запросов на маршрутизацию потоков с разными приоритетами, то в первую очередь рассматриваются потоки с наивысшим приоритетом.

**Заключение.** Решена задача нахождения оптимального маршрута для передачи трафика с учетом нагрузки на сеть, остаточной пропускной способности ее звеньев и требований к маршрутизации при условии непостоянной стоимости передачи трафика и возможности его разделения.

Предложенный метод может быть применен и для решения задачи маршрутизации в транспортных информационно-коммуникационных сетях сложной структуры. Реализация метода осуществляется посредством разбиения орграфа сети на компоненты, для каждого из которых применяется изложенный метод и соответствующие алгоритмы маршрутизации с последующей композицией общего решения.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О–2.3/03).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Capone A., Fratta L., Martignon F. Dynamic online QoS routing schemes: performance and bounds // Computer Networks. 2006. N 50. P. 966—981.
2. Capone A., Fratta L., Martignon F. Dynamic routing of bandwidth guaranteed connections in MPLS networks // Intern. Journal on Wireless & Optical Communications. 2003. N 1. P. 75—86
3. Kwong Kin-Wah, Guerin R., Shakh A., Shu Tao. Balancing performance, robustness and flexibility in routing systems // Proc. of ACM CoNEXT. Madrid, 2008. P. 372—383.
4. Hadjiona M., Georgiou C., Papa M., Vassiliou V. A hybrid fault-tolerant algorithm for MPLS networks // Proc. of WWIC. Tampere. 2008. P. 41—52.
5. Ефремов А. С., Зеленцов В. А., Миронов А. С., Уласень С. Н. Прогнозирование остаточного ресурса коммуникационного оборудования // Вестн. связи. 2004. № 4. С. 93—99.

6. Гайдамака Ю. В., Летников А. И., Пиеничников А. И., Чукарин А. В. Системы сигнализации в сетях с коммутацией каналов и пакетов. М.: ООО „Инсвязьиздат“, 2008. 195 с.
7. Chukarin A., Naumov V., Samouylov K. An approach to MPLS system design // Proc. of Intern. Conf. IN 2001: Services, Interfaces, Specifications. M.: MAX Press, 2001. P. 1—29.
8. Березко М. П., Вишневецкий В. М., Левнер Е. В., Федотов Е. В. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. 2001. Т. 1, № 2. С. 103—125.
9. Горовая М. А., Чукарин А. В. О задаче расчета маршрутизации сети MPLS с учетом требований протокола SIP // Тр. XLV Всерос. конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии. Секции математики и информатики. М.: Изд-во РУДН, 2009. С. 163—164.

#### Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Зеленцов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;  
E-mail: zvambler@rambler.ru
- Евгений Геннадьевич Цивирко** — канд. техн. наук; Правительство Санкт-Петербурга, Председатель Комитета по информатизации и связи; E-mail: kis@gov.spb.ru
- Алексей Валерьевич Чукарин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Российский университет дружбы народов, кафедра систем телекоммуникаций, Москва;  
E-mail: chukarin@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

УДК 519.248

С. В. КОКОРИН, Ю. И. РЫЖИКОВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕТЕЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассматриваются методы оптимизации параметров сетей массового обслуживания, задаваемых с использованием как аналитических, так и имитационных моделей.

**Ключевые слова:** имитационная модель, аналитическая модель, теория очередей, численная оптимизация с ограничениями, однородные системы и сети массового обслуживания.

**Введение.** Задача поиска оптимальных вероятностно-временных характеристик современных информационных систем (ИС) является весьма актуальной. ИС представляют собой сложные объекты, подверженные структурной динамике, поэтому для их моделирования необходимо создание совокупности моделей с различной степенью детализации.

Исследования показывают, что вопрос об оптимальном выборе характеристик ИС остается, как правило, за рамками постановки и решения классических задач анализа систем и сетей массового обслуживания (СМО) либо рассматривается применительно к простым моделям теории очередей, для которых существует аналитическое решение задач оптимизации, т.е. при экспоненциальном распределении времени обслуживания и интервалов между поступлениями заявок [1].

В настоящей статье предлагается использовать аналитические и имитационные модели (АМ, ИМ) теории очередей для ИС, описывающих рассматриваемую предметную область. По сравнению с существующими подходами исследуем более широкий класс моделей теории

очередей, допускающих произвольное распределение времени обслуживания в узлах сети в рамках задачи поиска ее оптимальных параметров.

**Постановка задачи.** Рассмотрим открытую однородную СМО, которая задается набором параметров  $(\mathbf{a}, \mathbf{n}, \{\mathbf{b}_i\}_{i=1}^M, R)$ , где  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_m)^T$  — первые  $m$  начальных моментов распределения интервалов между появлением заявок в источнике (выбираются в зависимости от требуемой точности решения задачи);  $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_M)^T$  — количество каналов в каждом из  $M$  узлов сети;  $\mathbf{b}_i = (b_{i1}, \dots, b_{im})^T$  — первые  $m$  начальных моментов распределения времени обслуживания заявок, задаваемых независимо для каждого узла сети;  $R = \|r_{ij}\|_{i,j=0}^{i,j=M+1}$  — матрица стационарных вероятностей переходов между узлами сети. При рассмотрении СМО под нулевым узлом будем понимать источник заявок, а под узлом с индексом  $M+1$  — сток сети. Два данных узла не являются частью сети и вводятся лишь для удобства обозначений. Представляющими интерес параметрами сети являются:  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_m)^T$  — моменты распределения времени пребывания заявок в сети и  $\boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \dots, \rho_M)^T$  — коэффициент загрузки для каждого узла сети.

Исследуем влияние структуры однородной сети на ее пропускную способность. В данном случае оптимизируемыми параметрами являются элементы матрицы  $R$ . В качестве целевых функций (ЦФ) выберем две, позволяющие количественно оценить такие аспекты, как эффективность и отказоустойчивость исследуемой СМО соответственно:

$$J_1 = v_1(R) \rightarrow \min_{R \in \Omega},$$

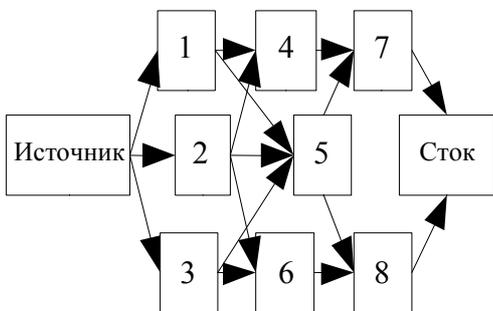
где  $\Omega$  — множество допустимых значений элементов матрицы  $R$ ;

$$J_2 = \rho(R) = 1/M \sum_{i=1}^M \rho_i^2(R) - 1/M^2 \left( \sum_{i=1}^M \rho_i(R) \right)^2 \rightarrow \min_{R \in \Omega}.$$

ЦФ  $J_1$  можно интерпретировать как среднее время прохождения заявки через СМО, а ЦФ  $J_2$  — как показатель равномерности распределения нагрузки между узлами сети.

Множество  $\Omega$  содержит естественные ограничения:  $\sum_{j=0}^{M+1} r_{ij} = 1 \forall i \in \{0, \dots, M+1\}$  [2].

В общем случае предполагается, что далеко не все узлы СМО связаны друг с другом, поэтому для многих элементов матрицы  $R$  существует ограничение вида  $r_{ij} = 0$ . Предполагается так-



же, что имеется возможность выбирать не все элементы матрицы  $R$ . Модель сети с подобными ограничениями приведена на рисунке, где элементы матрицы  $R$ , которые могут принимать ненулевое значение, обозначены стрелками.

В дополнение к сказанному необходимо отметить, что можно задавать ограничения на элементы матрицы  $R$  следующим образом:

$$f'(R) = I(R \in \Omega') f(R),$$

где  $f(R)$  — некоторая целевая функция,  $I(R)$  — индикатор принадлежности матрицы  $R$  множеству  $\Omega'$ , которое задается произвольным образом и является подмножеством  $\Omega$ .

Кроме того, примем, что:

—  $a \leq r_{ij} \leq A$ , где  $(a, A)$  — произвольные константы; при этом проверка согласованности ограничений для различных  $r_{ij}$  не проводится; в случае когда данные ограничения не выполняются, то с использованием предлагаемого в статье метода решение не может быть найдено;

—  $b \leq \rho_i(R) \leq B$ , где  $(b, B)$  — произвольные константы.

Введение перечисленных ограничений позволяет учесть факторы износа оборудования, а также специфику различных транспортных путей между узлами, что в целом обеспечивает возможность моделирования реальных ИС с учетом особенностей их функционирования.

**Расчет характеристик сети.** Известно, что в общем случае [2] численный расчет параметров открытой СМО с учетом преобразования потоков заявок включает в себя следующие шаги.

*Шаг 1.* Аппроксимация входных данных по методу моментов с помощью экспоненциального либо гиперэкспоненциального распределения в зависимости от особенностей модели.

*Шаг 2.* Задание начальных значений  $\lambda_i$  для потоков поступающих заявок. Данные потоки принимаются простейшими с интенсивностью, определяемой при решении системы уравнений, описывающих условие баланса потоков:

$$\lambda_i = \Lambda r_{0i} + \sum_{j=1}^M \lambda_j r_{ij}, \quad i = 1, \dots, M,$$

где  $\Lambda$  — суммарная интенсивность потока заявок, поступающих от внешних источников.

*Шаг 3.* Проверка отсутствия перегрузки во всех узла сети:  $\lambda_i b_{i1} / n(i) < 1$ . Коэффициенты немарковости [2] входящих потоков для каждого узла на первой итерации полагаются равными  $\xi_i^{(0)} = 0, i = 1, \dots, M$ .

*Шаг 4.* Решение поочередно для всех узлов следующих подзадач:

— оценка распределений временных интервалов между поступлением заявок в  $i$ -й узел со всех узлов сети;

— суммирование полученных оценок распределений;

— расчет новых коэффициентов немарковости  $\left\{ \xi_i^{(k)} \right\}_{i=1}^M$ , определение невязки

$$\Delta_i^{(k)} = \left| \xi_i^{(k)} - \xi_i^{(k-1)} \right| \text{ для текущей итерации } k;$$

— расчет узла как изолированной системы массового обслуживания;

— расчет оценки распределений интервалов потока заявок, выходящего из  $i$ -го узла;

*Шаг 5.* Если  $\max_{i \in \{1, \dots, M\}} \Delta_i > \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданный порог невязки, возвращение к шагу 4.

*Шаг 6.* Расчет моментов распределения времени пребывания заявки в узлах при каждом посещении.

*Шаг 7.* Расчет моментов распределения времени пребывания заявки в сети в целом.

Оценки характеристик рассматриваемого класса СМО также можно получить с помощью имитационных моделей, однако в этом случае вычислительные затраты, связанные с получением окончательных решений, значительно возрастают по сравнению с подходом, использующим аналитические модели.

**Методы оптимизации параметров СМО.** Для вычисления и оптимизации целевых функций  $J_1, J_2$  предлагается использовать метод глобального поиска — *метод пси-*

преобразования [3] — и метод численной оптимизации без вычисления производных — метод главных осей Брента [4].

**Метод пси-преобразования** является методом поиска глобального экстремума целевой функции и не критичен к выбору начальной оценки. Однако для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы в том случае, если увеличивается размерность пространства оптимизируемых параметров. Для ЦФ  $J_1$  в качестве пси-функции была выбрана вероятностная мера множества точек, на котором пропускная способность сети выше заданного уровня, а для ЦФ  $J_2$  — вероятностная мера множества точек, на котором величина  $\rho(R)$  меньше заданного положительного значения. В этом случае задача оптимизации параметров СМО сводится к поиску решения уравнения с многими переменными (оптимизируемыми параметрами).

Рассмотрим алгоритм, реализующий метод пси-преобразования [3].

*Шаг 1.* Оценка разброса значений целевой функции методом случайных испытаний.

*Шаг 2.* Выбор множества значений уровней  $v_1(R) \geq \zeta_l$ ,  $l \in \{1, \dots, L\}$ , где  $L$  — заданное количество уровней, а  $\zeta_l$  — величины, определяемые по оценкам разброса целевой функции, полученным на шаге 1.

*Шаг 3.* Вычисление средних значений целевой функции для каждого уровня методом случайных испытаний:

$$\Psi_l = 1/q \sum_{\{R^{(s)}: v_1(R^{(s)}) \geq \zeta_l\}} (v_1(R^{(s)}) - \zeta_l),$$

где  $q$  — число испытаний,  $R^{(s)}$  — матрица переходов при  $s$ -м испытании и  $l \in \{1, \dots, L\}$ .

*Шаг 4.* Вычисление средних значений параметров элементов матрицы  $R$  для каждого уровня:

$$x_{ijl} = q / \Psi_l \sum_{\{R^{(s)}: v_1(R^{(s)}) \geq \zeta_l\}} r_{ij}^{(s)} (v_1(R^{(s)}) - \zeta_l)^\alpha,$$

где  $\alpha = [1; \infty]$  — параметр метода оптимизации.

*Шаг 5.* Параболическая аппроксимация и экстраполяция величин  $\Psi_l$  на уровень 0.

Вследствие высокой вычислительной сложности метода пси-преобразования и его недостаточной точности при оптимизации ЦФ  $J_1$  и  $J_2$  при большой размерности СМО предлагается использовать **метод главных осей Брента**. Данный метод ориентирован на локальную оптимизацию функции многих переменных без вычисления производных. На практике метод эффективен при решении задач оптимизации структуры СМО, в том числе, и для случая, когда пространство параметров имеет большую размерность. Основным недостатком алгоритма, реализующего данный метод, является необходимость задания начальной оценки, которая должна быть вычислена отдельно для каждой конкретной задачи. Кроме того, необходимо задать два параметра —  $\delta$  и  $\Delta z$ : параметр  $\delta$  определяет момент останова итерационного процесса,  $\Delta z$  — максимальную длину шага алгоритма.

Приведем шаги алгоритма, реализующего метод главных осей для вычисления целевых функций  $J_1$  и  $J_2$ .

*Шаг 1.* Вычисление начальной оценки матрицы  $R^{(0)}$ .

*Шаг 2.* Задание начальных направлений одномерного поиска:  $U^0 = \left\| (u_i)^{(0)} \right\|_{i=1}^{M(M+2)} = I$ ,

где  $I$  — единичная матрица.

*Шаг 3.* Поиск оптимального значения ЦФ поочередно вдоль каждого направления методом золотого сечения с начальным интервалом  $2\Delta z$ . Перенос текущих значений оптимальных параметров во вновь найденную точку, которую обозначим как  $R^{(k)}$ .

*Шаг 4.* Вычисление величины  $\Delta z = 2 \cdot \|R^{(k)} - R^{(k-1)}\|$ .

*Шаг 5.* Исключение вектора  $u_{M(M+2)}^{(k-1)}$ , переход к матрице направлений следующего вида:  $U^k = (R^{(k)} - R^{(k-1)}, u_1^{(k-1)}, u_2^{(k-1)}, \dots, u_{M(M+2)-1}^{(k-1)})$ .

*Шаг 6.* После полной смены направляющего набора векторов  $U^{M(M+2)}$  обновление набора полностью с замещением его ортогональной матрицей, аппроксимирующей гессиан целевой функции в текущей точке.

*Шаг 7.* Повтор шагов 3—6 до тех пор, пока абсолютная разность значений ЦФ на последовательных итерациях не станет меньше  $\delta$ .

Выбор начальной оценки при реализации метода главных осей предлагается осуществлять с использованием модели сети Джексона [4], для которой существует аналитическое решение поставленной задачи.

Многоканальные узлы замещаются одноканальными с пропорционально увеличенной интенсивностью времени обслуживания  $\mu' = 1/b_i n(i)$ . Экспоненциальное распределение времени обслуживания в каждом узле аппроксимируется с учетом первых моментов заданных распределений. Последовательный обход сети в ширину позволяет выбрать начальные оценки для каждого узла на основе решения следующей оптимизационной задачи:

$$\sum_{j=1}^{M+1} \frac{r_{ij}}{\mu'_j - r_{ij} \lambda_j} \rightarrow \min_{R \in \Omega}$$

Использование данного метода выбора начальных оценок эффективно (в вычислительном отношении) при небольшом числе каналов в узлах и малых значениях коэффициентов вариации времени обслуживания в узлах. В качестве альтернативы используется метод пси-преобразования. Его реализация предпочтительнее для сетей, в которых закон распределения времени обслуживания значительно отличается от экспоненциального (например, равномерный закон распределения на отрезке или гамма-распределение с высокой вариацией.).

Сравнительный анализ начальных оценок матрицы  $R$ , полученных методом построения сети Джексона и методом пси-преобразования для расчета оптимального значения ЦФ  $J_1$ , представлен в таблице, где  $K$  — количество итераций.

| $M$ | Метод Джексона |        | Метод пси-преобразования |        | $J_1$ |
|-----|----------------|--------|--------------------------|--------|-------|
|     | $v_1(R)$       | $K$    | $v_1(R)$                 | $K$    |       |
| 3   | 2,91           | 319    | 2,91                     | 651    | 2,18  |
| 5   | 3,35           | 895    | 3,57                     | 1293   | 3,19  |
| 8   | 4,9            | 6067   | 4,83                     | 5419   | 4,53  |
| 13  | 7,02           | 21939  | 7,92                     | 41345  | 6,57  |
| 21  | 9,05           | 212939 | 8,84                     | 201323 | 8,64  |

**Численные эксперименты.** Для сравнения результатов, полученных с использованием аналитических и имитационных моделей СМО, рассмотрим простую сеть, состоящую из 8 узлов, расположенных в трех ярусах (см. рисунок). При варьировании элементов, входящих в матрицу  $R$  вероятностей переходов между узлами, можно получить одинаковые результаты как на АМ, так и на ИМ. По сравнению с численной оптимизацией на АМ процедура поиска параметров на ИМ отличается плохой сходимостью соответствующего локального метода, которая определяется тем, что при имитации целевые функции принимают случайные значения.

Для уменьшения влияния данного фактора требуется увеличить число имитационных экспериментов, при этом высокая точность требуется только на последних шагах метода при малых значениях  $\Delta z$ . Поэтому для повышения эффективности вычислений ЦФ на ИМ был реализован расчет с использованием метода Brenta, при котором точность расчета целевой функции зависит от длины шага как  $q_0 / \Delta z$ .

**Выводы.** В задачах оптимизации характеристик СМО вопросы повышения эффективности соответствующих вычислительных процедур, связанных с расчетом ЦФ, приобретают особую актуальность. При этом использование ИМ в данных задачах требует значительного количества информационных и временных ресурсов. Кроме того, такое моделирование характеризуется невысокой точностью расчета экстремальных значений ЦФ вследствие статистических погрешностей имитации. Поэтому в данной ситуации целесообразен поиск аналогичных параметров СМО с использованием АМ, что обусловлено значительно меньшими затратами информационных ресурсов, сокращением общего времени на проведение соответствующих расчетов ЦФ, а сами значения рассматриваемых функций вычисляются с меньшими погрешностями.

Предложенный в настоящей статье оригинальный подход к разработке и реализации методов оптимизации параметров различных типов сетей массового обслуживания основан на комбинированном использовании методов глобальной и локальной оптимизации, при этом недостатки метода, базирующегося на имитационной модели, компенсируются достоинствами аналитического метода.

Исследования по данной тематике проводились при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 09-07-00066а, 09-07-11004, 08-08-00346-а, 10-08-0906-а, 10-08-90027-Бел-а) и Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О-2.3/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bramson M.* Stability of Queuing Networks [Электронный ресурс]: <<http://projecteuclid.org/DPubS?service=UI&version=1.0&verb=Display&handle=euclid.ps/1220879338>>.
2. *Рыжиков Ю. И.* Машинные методы расчета систем массового обслуживания. Л.: ВИКИ им А. Ф. Можайского, 1979.
3. *Чичинадзе В. К.* Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Метод пси-преобразования. М.: Наука, 1983.
4. *Brent R. P.* Algorithms for Minimization without Derivatives. NJ: Prentice-Hall, Inc., 1973.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные информационные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.

#### Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Кокорин** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: kokorins@rambler.ru
- Юрий Иванович Рыжиков** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: ryzhbox@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

И. В. СОЛОВЬЕВА, О. И. СЕМЕНКОВ, Б. В. СОКОЛОВ

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ПЛАНОВ РАБОТЫ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОЗИЦИОННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассматривается задача коррекции планов работы корпоративной информационной системы. Для ее решения предлагается использовать метод позиционной оптимизации, позволяющий корректировать план работы системы в режиме реального времени.

*Ключевые слова:* динамические модели программного управления, метод позиционной оптимизации, корпоративная информационная система.

**Введение.** В настоящей статье предлагается еще один вариант использования ранее построенной обобщенной динамической модели функционирования корпоративной информационной системы (ИС) при формальной постановке и решении задачи коррекции ее планов [1—3]. Напомним, что ранее в работах [2, 5] было показано, как указанную обобщенную модель можно использовать при постановке и решении задач оперативного (календарного) планирования работы различных систем активных подвижных объектов (АПО). К числу таких объектов относятся космические средства; транспортные средства воздушного, наземного и водного базирования, обеспечивающие интермодальные перевозки в цепях поставок; аппаратно-программные средства, входящие в состав современных „виртуальных предприятий“. При управлении такими объектами возникает необходимость формального описания и оперативного решения задач коррекции и перепланирования их работы, вызванная действием различных видов возмущений, имеющих как объективную, так и субъективную природу. В настоящей статье рассматривается задача коррекции планов работы корпоративной ИС с учетом текущей информации об ее состоянии в заданные дискретные моменты времени. Предполагается, что периодичность и состав информации, поступающей в указанные моменты времени, определяются на основе специальных методик [2]. Предварительные исследования показали, что при постановке и решении задачи коррекции плана работы корпоративной ИС целесообразно осуществлять поиск управляющих воздействий в классе дискретных кусочно-постоянных ограниченных функций, используя ранее предложенный метод позиционной оптимизации [6—8]. С помощью этого метода значения корректирующих воздействий, компенсирующих возмущения, определяются как позиционные решения вспомогательных (сопровождающих) задач оптимального управления. В основу метода позиционной оптимизации положены известные математические методы решения задач оптимального управления и адаптивные методы решения задач линейного программирования [6—8].

**Обобщенная динамическая модель управления корпоративной информационной системой.** Следуя работам [1, 3], рассмотрим обобщенную динамическую модель планирования работы корпоративной ИС, в состав которой будет включено несколько моделей. Введем следующие обозначения:  $A = \{A_i; i = 1, \dots, n\}$  — множество целевых и обеспечивающих функционирование системы процессов;  $B = \{B_j; j = 1, \dots, m\}$  — множество объектов (подсистем, элементов), входящих в состав системы;  $D = \{D_k^i; k \in i = 1, \dots, S_i\}$  — множество операций, входящих в состав множества процессов  $A$ ;  $P = \{P_\rho^i; \rho = 1, \dots, \Pi_i\}$  — множество информационных

потоков, образующихся при функционировании корпоративной ИС;  $K = \{K_v \cup \tilde{K}_\mu; v = \overline{1, \dots, \omega}, \mu = \overline{1, \dots, \tilde{\omega}}\}$  — множество центров обработки информации (ЦОИ);  $E = \{D_{v\mu}^{\tilde{i}}; \tilde{i} = \overline{1, \dots, \tilde{n}}, v = \overline{1, \dots, \omega}, \mu = \overline{1, \dots, \tilde{\omega}}, v \neq \mu\}$  — множество вспомогательных процессов, связанных с синхронизацией информации между основными ЦОИ (ОЦОИ)  $K_v$  и резервными ЦОИ (РЦОИ)  $\tilde{K}_\mu$ .

Модель программного управления операциями, выполняемыми в корпоративной ИС, описывается выражениями

$$\dot{x}_{ik}^{(o,1)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \theta_{ikj} u_{ikj}^{(o,1)}(t); \quad \dot{x}_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} = u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t), \quad i = \overline{1, \tilde{n}}, \quad v = \overline{1, \omega}, \quad \mu = \overline{1, \tilde{\omega}};$$

$$\dot{x}_i^{(o,3)} = u_i^{(o,3)}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, S_i},$$

где  $\varepsilon_{ij}(t)$ ,  $\theta_{ikj}(t)$  — известные булевы функции времени, такие что  $\varepsilon_{ij}(t) = 1$ , если процесс  $A_i$  находится в зоне взаимодействия с объектом (ресурсом)  $B_j$ ,  $\varepsilon_{ij}(t) = 0$  иначе;  $\theta_{ikj}(t) = 1$ , если на ресурсе  $B_j$  есть средства для выполнения операции  $D_k^i$ ,  $\theta_{ikj}(t) = 0$  иначе;  $x_{ik}^{(o,1)}$  — переменная, характеризующая состояние выполнения операции  $D_k^i$  при реализации процесса  $A_i$ ;  $x_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}$  — переменная, характеризующая состояние выполнения вспомогательного процесса  $D_{v\mu}^{\tilde{i}}$ , в ходе реализации которого должна осуществляться передача информации типа  $\rho$  из ОЦОИ  $K_v$  в РЦОИ  $\tilde{K}_\mu$ ;  $x_i^{(o,3)}$  — переменная, характеризующая состояние вспомогательной операции.

Соответствующие управляющие воздействия обозначены как  $u_{ikj}^{(o,1)}(t)$ ,  $u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t)$ ,  $u_i^{(o,3)}(t)$ , при этом

$$u_{ikj}^{(o,1)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если операция } D_k^i \text{ выполняется} \\ & \text{при } A_i \text{ с использованием } B_j; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если осуществляется передача} \\ & \text{информации типа } \rho \text{ из } K_v \text{ в } \tilde{K}_\mu; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$u_i^{(o,3)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{в момент завершения процесса } A_i; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Ограничения и краевые условия модели задаются выражениями

$$\sum_{j=1}^m u_{ikj}^{(o,1)} \left[ \sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} \left( a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}(t) \right) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} \left( a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}(t) \right) \right] = 0;$$

$$u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} \left[ \left( a_{S_i}^{(o,1)} - x_{S_i}^{(o,1)}(t) \right) + \left( a_{S_i}^{(p,1)} - x_{S_i}^{(p,1)}(t) \right) \right] = 0;$$

$$\sum_{j=1}^m u_{ikj}^{(o,1)} \leq 1 \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, S_i}; \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj}^{(o,1)} \leq R_j^{(o,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \quad \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_{\tilde{i}}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} \leq R_v^{(o,1)} \quad \forall v = \overline{1, \omega};$$

$$u_i^{(o,3)} \left( a_{iS_i}^{(o,1)} - x_{iS_i}^{(o,1)} \right) = 0; \quad u_{ikj}^{(o,1)}, u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}, u_i^{(o,3)} \in \{0, 1\}; \quad \mathbf{h}_0^{(o)}(\mathbf{x}^{(o)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}_1^{(o)}(\mathbf{x}^{(o)}(t_f)) \leq \mathbf{0},$$

где  $a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}$ ,  $a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}$ ,  $a_{S_i}^{(o,1)}$ ,  $a_{S_i}^{(p,1)}$ ,  $a_{iS_i}^{(o,1)}$  — заданные величины (краевые условия), значения которых могут принять соответствующие переменные  $x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}$ ,  $x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}$ ,  $x_{S_i}^{(o,1)}$ ,  $x_{S_i}^{(p,1)}$ ,  $x_{iS_i}^{(o,1)}$  в момент времени

$t = t_f$ ;  $\Gamma_{ik1}, \Gamma_{ik2}$  — множества номеров операций взаимодействия, проводимых с использованием объектов  $B_j$  и непосредственно предшествующих операции  $D_k^j$ ; заданные величины  $R_j^{(o,1)}, R_v^{(o,1)}$  характеризуют соответственно пропускную способность (производительность) объектов (ресурсов)  $B_j$  и ОЦОИ  $K_v$ ;  $\mathbf{h}_0^{(o)}, \mathbf{h}_1^{(o)}$  — известные дифференцируемые функции, задающие соответствующие краевые условия.

Показатели качества планирования работы корпоративной ИС в этом случае определяются следующим образом:

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{k=1}^{S_j} \left( a_{ik}^{(o,1)} - x_{ik}^{(o,1)}(t_f) \right)^2 + \sum_{v=1}^{\omega} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \left( a_{v\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)} - x_{v\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t) \right)^2 \right];$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \alpha_{ik}^{(o,1)}(\tau) u_{ikj}^{(o,1)}(\tau) d\tau,$$

где  $a_{ik}^{(o,1)}, a_{v\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}$  — заданные величины, значения которых должны принять соответствующие переменные в конце интервала планирования; с помощью заданных функций  $\alpha_{ik}^{(o,1)}(\tau)$  задаются штрафы за нарушение директивных сроков выполнения соответствующих операций; показатель вида  $J_1$  позволяет оценить суммарную точность выполнения краевых условий (заданной технологии функционирования системы), а критериальная функция  $J_2$  — суммарные потери за невыполнение директивных сроков реализации операций в системе.

Модель программного управления ресурсами корпоративной ИС представляется выражениями

$$\dot{x}_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \theta_{ikj} u_{ikj}^{(o,1)}(t), j = \overline{1, m}; \mathbf{h}_0^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)}(t_f)) \leq \mathbf{0}; J_3 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (T - x_j^{(k)}(t_f))^2,$$

где переменная  $x_j^{(k)}$  характеризует состояние ресурса (объекта)  $B_j$  в момент времени  $t$ ;  $T = t_f - t_0$ ;  $\mathbf{h}_0^{(k)}, \mathbf{h}_1^{(k)}$  — известные дифференцируемые функции, задающие соответствующие краевые условия; с помощью показателя качества планирования вида  $J_3$  можно косвенно оценить равномерность использования ресурсов корпоративной ИС на интервале планирования.

Модель программного управления информационными потоками в корпоративной ИС представляется выражениями

$$\dot{x}_{ikj}^{(p,1)} = u_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad \dot{x}_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)} = u_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t); \quad 0 \leq u_{ikj}^{(p,1)}(t) \leq C_{ikj}^{(p,1)} u_{ikj}^{(o,1)}(t), \quad 0 \leq u_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t) \leq C_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)} u_{v\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t),$$

где переменная  $x_{ikj}^{(p,1)}$  характеризует текущий объем информации, обработанной с использованием ресурса  $B_j$ ; переменная  $x_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}$  характеризует объем информации типа  $\rho$ , переданной из ОЦОИ  $K_v$  в РЦОИ  $\tilde{K}_\mu$ ; управляющие воздействия  $u_{ikj}^{(p,1)}(t), u_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t)$  характеризуют соответственно интенсивности обработки информации в ОЦОИ и передачи ее в РЦОИ; константы  $C_{ikj}^{(p,1)}, C_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}$  задают максимально возможное значение интенсивности обработки  $u_{ikj}^{(p,1)}(t)$  и передачи  $u_{v\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t)$  информации.

Ограничения и краевые условия модели задаются выражениями

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj}^{(p,1)} \leq R_j^{(p,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \quad \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)} \leq R_{\nu}^{(p,1)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega};$$

$$\mathbf{h}_0^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}_1^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_f)) \leq \mathbf{0}.$$

Здесь величины  $R_j^{(p,1)}$ ,  $R_{\nu}^{(p,1)}$  задают максимальную интенсивность обработки информации на объекте  $B_j$  и максимальную пропускную способность каналов связи ОЦОИ;  $\mathbf{h}_0^{(p)}$ ,  $\mathbf{h}_1^{(p)}$  — известные дифференцируемые функции, задающие краевые условия.

Показатели качества программного управления информационными потоками определяются как

$$J_4 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^{S_i} \left( a_{ik}^{(p,1)} - x_{ik}^{(p,1)}(t_f) \right)^2 + \sum_{\nu=1}^{\omega} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \left( a_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)} - x_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)}(t) \right)^2 \right],$$

$$J_5 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \beta_{ik}^{(p,1)}(\tau) u_{ikj}^{(p,1)}(\tau) d\tau,$$

где  $a_{ik}^{(p,1)}$ ,  $a_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)}$  — заданные величины, значения которых могут принять соответствующие переменные; с помощью гладкой функции времени  $\beta_{ik}^{(p,1)}(\tau)$  в каждый момент  $\tau$  задается уровень качества обработки информационного потока, возникающего при выполнении операции  $D_k^i$ .

Окончательно, используя все вышеперечисленные соотношения, можно построить следующую обобщенную динамическую модель программного управления корпоративной ИС:

$$M = \begin{cases} \mathbf{u}(t) \mid \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \\ \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{0}; \\ \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0}, \end{cases} \quad (1)$$

здесь  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^{(o)T}, \mathbf{x}^{(k)T}, \mathbf{x}^{(p)T})^T$  — вектор состояния системы (1);  $\mathbf{u} = (\mathbf{u}^{(o)T}, \mathbf{u}^{(k)T}, \mathbf{u}^{(p)T})^T$  — вектор управления системой (1);  $\mathbf{h}_0$ ,  $\mathbf{h}_1$  — известные функции, задающие краевые условия в моменты  $t = t_0, t = t_f$ ;  $\mathbf{q}^{(1)}$ ,  $\mathbf{q}^{(2)}$  — обобщенная запись ограничений, накладываемых на процесс функционирования корпоративной ИС.

Для окончательной формулировки обобщенной задачи планирования работы корпоративной ИС необходимо также ввести вектор показателей качества программного управления:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}^{(o)T}, \mathbf{J}^{(k)T}, \mathbf{J}^{(p)T})^T.$$

В рамках предложенного подхода к формализации постановки задачи планирования работы корпоративной ИС она может интерпретироваться как задача программного управления соответствующим комплексом операций. В работах [1, 3] показано, как на этапе планирования с использованием модели (1) указанная задача может быть преобразована с помощью принципа максимума в краевую двухточечную задачу. При этом вместо исходного класса допустимых управлений  $U = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid u_{ikj}^{(o,1)}(t), u_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t), u_i^{(o,3)}(t) \in \{0, 1\}; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0} \right\}$

предлагается рассматривать расширенный класс управлений  $U_p = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid u_{ikj}^{(o,1)}(t), u_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), u_i^{(o,3)}(t) \in [0, 1]; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0} \right\}$ .

**Постановка задачи коррекции планов работы корпоративной ИС.** Рассмотрим, как необходимо изменить описание обобщенной модели программного управления  $M$  (см. систему (1)) с тем, чтобы учесть в ней постоянно действующие ограниченные возмущения, возникающие на этапе реализации плана. Будем считать, что при функционировании корпоративной ИС в некоторые моменты времени  $t_\sigma \in [t_0, t_f)$  в координирующий орган этой системы поступает информация о ее текущем состоянии (состоянии системы (1)) в виде вектора состояния  $\mathbf{x}_\sigma$ .

В этом случае задача коррекции планов работы корпоративной ИС состоит в следующем: в процессе реализации плана работы ИС на интервале  $[t_0, t_f)$  найти новое программное управление  $\mathbf{u}_k(t)$  (на основе коррекции  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{pr}(t)$ ), которое удовлетворяет ограничениям и краевым условиям модели (1), и при этом показатель качества реализации плана вида

$$\tilde{J} = \int_{t_0}^{t_f} |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_{pr}(t)| dt \rightarrow \min$$

принимает минимальные значения. При этом пусть

$\mathbf{u}_{pr}(t), \mathbf{x}_{pr}(t)$  — соответственно программное управление корпоративной ИС и ее текущее состояние, рассчитанные на этапе планирования.

Введем в рассмотрение вектор отклонений  $\mathbf{y}(t)$  фактической „траектории движения“  $\mathbf{x}(t)$  динамической системы (1) от планируемой траектории (плана)  $\mathbf{x}_{pr}(t)$  и вектор управлений  $\mathbf{w}(t)$ , который определяется из выражения  $\mathbf{u}_k(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t)$  и удовлетворяет следующему условию:

$$w_{ikj}^{(o,1)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в исходном плане } u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) = 0, \\ & \text{а при коррекции плана требуется выполнить операцию } D_{ikj}^i \\ & \text{с использованием ресурса } B_j; \\ -1, & \text{если в исходном плане } u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) = 1 \text{ и при коррекции плана} \\ & \text{данное управляющее воздействие следует отменить;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Аналогичным образом определим  $w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t)$  и  $w_i^{(o,3)}(t)$ , а ограничения на управляющие воздействия  $w_{ikj}^{(p,1)}(t)$  и  $w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t)$  будут описаны далее.

При решении задачи коррекции плана корпоративной ИС будем искать функции  $w_{ikj}^{(o,1)}(t), w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), w_i^{(o,3)}(t)$ , как и на этапе планирования, в расширенном классе допустимых управлений:

$$\bar{U}_p = \left\{ \mathbf{w}(t) \mid w_{ikj}^{(o,1)}(t), w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), w_i^{(o,3)}(t) \in [-1, 1]; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_k) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_k) \leq \mathbf{0} \right\}.$$

При использовании в модели (1) сформированного по определенному правилу управления  $\mathbf{u}_k(t)$  получим новую модель управления  $\tilde{M}$ , которая с формальной точки зрения является линейной конечномерной нестационарной динамической системой (ДС). Она содержит нелинейные логические ограничения, задаваемые в виде равенств и неравенств, а также имеет нелинейные показатели качества.

**Применение метода позиционной оптимизации.** Для коррекции плана работы корпоративной ИС, задаваемого с помощью величин  $\mathbf{u}_{pr}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{pr}(t)$ , предлагается использовать конструктивные методы теории оптимального управления. Так, применяя метод позиционной оптимизации [6—8], корректирующее управление в текущий момент времени будем искать как позиционное решение вспомогательной задачи оптимального управления.

Рассмотрим интервал времени, на котором была ранее решена задача программного управления:  $[t_0, t_f)$ ,  $t_0 < t_f < +\infty$ . Зададим шаг дискретности  $h = (t_f - t_0)/L$ , где  $L$  — целое число. Определим функцию  $\mathbf{w}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_f)$ , как дискретное управление  $\mathbf{w}(t) = \mathbf{w}(t_0 + lh)$  при  $t \in [t_0 + lh, t_0 + (l+1)h)$ ,  $l = \overline{0, L-1}$ . В этом классе дискретных управлений будем определять  $\mathbf{w}(t)$ , применяя метод позиционной оптимизации. Рассмотрим в момент времени  $\tau = t_\sigma$  задачу оптимального управления для сформированной ранее модели  $\tilde{M}$ . Обозначим:  $\mathbf{w}(\tau | \tau, \mathbf{z})$  — оптимальное программное управление для позиции  $(\tau, \mathbf{z})$  (позиционное решение) и назовем его оптимальным управлением вспомогательной задачи;  $Y(\tau)$  — множество всех возможных начальных состояний  $\mathbf{z} = \mathbf{y}(\tau)$ , для которых эта задача имеет решение при фиксированном  $\tau$ ,  $\mathbf{z} = \mathbf{y}(\tau)$ ,  $\mathbf{y}(\tau) \in Y(\tau)$ ,  $t \in T(\tau) = [\tau, t_f)$ .

Рассматриваемая задача относится к классу задач управления нелинейными динамическими системами вследствие того, что в предлагаемой модели  $\tilde{M}$ , как и в модели  $M$ , присутствуют нелинейные ограничения. Поэтому на этапе реализации плана работы корпоративной ИС введем агрегированные операции  $D^i = \bigcup_{k=1}^{S_i} D_k^i$ , для которых отсутствует необходимость учитывать нелинейные логические ограничения. Тогда в момент времени  $\tau$  вспомогательная задача оптимального управления агрегированной ДС имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^{S_i} \dot{y}_{ik}^{(o,1)} &= \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \theta_{ikj} w_{ikj}^{(o,1)}(t), \quad \dot{y}_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(o,2)} = w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), \quad \dot{y}_i^{(o,3)} = w_i^{(o,3)}(t), \quad \dot{y}_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \theta_{ikj} w_{ikj}^{(o,1)}(t), \\ \dot{y}_{ikj}^{(p,1)} &= w_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad \dot{y}_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(p,2)} = w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad \tilde{i} = \overline{1, \tilde{n}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad \nu = \overline{1, \omega}, \quad \mu = \overline{1, \tilde{\omega}}, \end{aligned} \right\} (2)$$

с ограничениями на управляющие воздействия  $\mathbf{w}(t)$ :

$$\begin{aligned} -\sum_{j=1}^m u_{ikj\ pr}^{(o,1)} &\leq \sum_{j=1}^m w_{ikj}^{(o,1)} \leq 1 - \sum_{j=1}^m u_{ikj\ pr}^{(o,1)} \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, S_i}; \\ -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(o,1)} &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} w_{ikj}^{(o,1)} \leq R_j^{(o,1)} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(o,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \\ -\sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} &\leq \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} \leq R_\nu^{(o,1)} - \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega}; \\ -u_{ikj\ pr}^{(p,1)}(t) &\leq w_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad w_{ikj}^{(p,1)}(t) - C_{ikj}^{(p,1)} w_{ikj}^{(o,1)}(t) \leq C_{ikj}^{(p,1)} u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) - u_{ikj\ pr}^{(p,1)}(t); \\ -u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t) &\leq w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t), \quad w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t) - C_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)}(t) \leq C_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)}(t) - u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t); \\ -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(p,1)} &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} w_{ikj}^{(p,1)} \leq R_j^{(p,1)} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(p,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \\ -\sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} &\leq \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} \leq R_\nu^{(p,1)} - \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega}. \end{aligned}$$

При этом краевые условия и показатель качества во вспомогательной задаче имеют соответственно следующий вид:  $\mathbf{y}(\tau) = \mathbf{y}_\tau$ ,  $\mathbf{y}(t_f) = \mathbf{0}$  и  $\hat{J}_\tau(z) = \min_{\tau} \int_{\tau}^{t_f} |\mathbf{y}(t)| dt$ . Тогда значения управления  $\mathbf{w}(t)$  будем определять последовательно, решая в каждый момент времени  $\tau = t_\sigma$  вспомогательные задачи с новыми начальными условиями  $\mathbf{y}(\tau = t_\sigma) = \mathbf{y}_\sigma$ . При этом с формальной точки зрения динамически формируемые вспомогательные задачи относятся к классу задач оптимального управления с интервальными ограничениями. В работе [6] показано, что в классе дискретных управлений они могут быть преобразованы в задачи линейного программирования с матрицей „ленточной“ структуры, для решения которых разработаны адаптивные методы.

**Заключение.** Основное достоинство и перспективность предложенного в статье подхода состоит в том, что применительно к АПО продемонстрирована возможность конструктивного использования результатов современной теории оптимального управления.

Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 10-08-90027, 09-07-00066, 08-08-00403, 09-07-11004), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 62—69.
2. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. Потрясаев С. А. Динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2009. 159 с.
4. Калинин В. Н. О теории управления активными подвижными объектами // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1981. Т. 24, № 6. С. 26—31.
5. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельное описание процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
6. Балашевич Н. В., Габасов Р. Ф., Кириллова Ф. М. Численные методы программной и позиционной оптимизации линейных систем управления // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2000. Т. 40, № 6. С. 838—859.
7. Габасов Р. Ф., Кириллова Ф. М., Ружижская Е. А. Демпфирование и стабилизация маятника при больших начальных возмущениях // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2001. № 6. С. 29—38.
8. Габасов Р. Ф., Ружижская Е. А. Стабилизация систем с обеспечением дополнительных свойств переходных процессов // Кибернетика и системный анализ. 2001. № 3. С. 139—151.

#### Сведения об авторах

- Инна Владимировна Соловьева** — СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. науч. сотрудник  
E-mail: isolovyeva@mail.ru
- Олег Игнатьевич Семенков** — канд. техн. наук; Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научным вопросам; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

А. В. ПАНЬКИН

## МЕТОД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается подход к реализации взаимодействия элементов корпоративной информационной системы на основе единой информационной модели. Предложены новые структуры модели и методика оценки стоимости ее построения и использования.

*Ключевые слова:* корпоративные информационные системы, информационное взаимодействие, представление информации, единая модель.

**Введение.** Существующие принципы автоматизации предприятий и разработки корпоративных информационных систем (ИС) не обеспечивают в должной мере интеграцию подсистем ИС. Задачи, возникающие при интеграции процессов, приложений и передачи данных в корпоративных ИС достаточно хорошо проработаны [1, 2], чего нельзя сказать об интеграции таких систем на уровне единого информационного пространства. В настоящее время широко используется онтологический подход при работе с данными [3—5]. Существуют различные средства для работы с онтологиями, в том числе инструменты интеграции онтологий. Однако онтологический подход имеет ряд недостатков: в частности, отсутствует формализованное описание данных каждого из интегрируемых компонентов и использование онтологий резко снижает оперативность работы с данными. Это в большинстве случаев приводит к невозможности формирования единого информационного пространства с использованием онтологического подхода.

Для разрешения возникающих противоречий разрабатываются частные достаточно дорогостоящие решения, связанные с разработкой новых (или доработкой существующих) компонентов, обеспечивающих интеграцию данных. Снизить стоимость интеграции компонентов корпоративной ИС можно за счет снижения затрат на разработку программного и информационного обеспечения. В интересах этого предлагается новый метод взаимодействия элементов корпоративной информационной системы.

**Основные положения метода.** Предлагаемый метод взаимодействия элементов корпоративной ИС основан на построении и использовании динамической информационной модели [6], которая представляет собой модель систем управления жизненным циклом предприятия в реальном масштабе времени. Модель содержит данные, соответствующие фактическим параметрам объекта и среды, в которой он функционирует. Компонентами модели являются динамические информационные модели подчиненных управляемых объектов, каждая из которых отображает, в соответствии с определенной системой правил, состояния информационных объектов и принципы их взаимодействия. С учетом изложенного построение динамической информационной модели корпоративной системы предлагается осуществлять на основе двух взаимосвязанных моделей:

— единой модели представления информации (модель  $P$ ) — универсальной информационно-логической метамодели, предоставляющей программе структуру сущностей предметной области;

— единой модели информационного взаимодействия (модель  $L$ ) — универсальной метамодели, предоставляющей программе структуру сущностей, содержащихся в информационном сообщении.

Метод взаимодействия элементов корпоративной ИС представляет собой совокупность взаимосвязанных подходов к построению моделей  $P$  и  $I$  и приведению информации к единой модели ее представления.

**Описание единой модели представления информации.** Модель  $P$  может быть представлена как множество классов  $C$  и объектов  $E$ , каждый из которых обладает характерным для него множеством свойств  $K$ .

Класс  $c_i \in C$  содержит описание совокупности схожих по своему проявлению объектов. Каждый класс  $c_i$  задается множеством свойств, среди которых выделяют следующие: уникальный идентификатор класса, название класса, описание класса, идентификатор базового класса. Между классами определено отношение иерархии: класс  $c_i$  есть подкласс класса  $c_j$  (а класс  $c_j$  — суперкласс  $c_i$ ), если мощность множества свойств класса  $c_i$  не меньше мощности множества свойств класса  $c_j$ :  $|c_i| \geq |c_j|$ , и все свойства класса  $c_i$  определены и для класса  $c_j$ .

В свою очередь, каждый объект  $e_i \in E$  также представляется множеством свойств, среди которых выделяют свойства, аналогичные названным для классов (уникальный идентификатор объекта, название объекта и т.п.).

И классам, и объектам присущи специальные свойства, характеризующиеся набором определенных параметров.

Подробное описание классов, объектов и свойств, составляющих структуру единой модели представления информации, приведено в работе [6].

**Описание единой модели информационного взаимодействия (модель  $I$ ).** Предлагаемая единая модель [6] определяет формат данных, передаваемых между элементами корпоративной ИС. Передача данных осуществляется в форме сообщений об объектах, описываемых сущностями.

Множество всех сущностей обозначается как  $S$ . Каждая сущность  $s_i \in S$  представляется множеством атрибутивных и предметных ключей. Атрибутивными ключами, хранящими значения типичных свойств объекта, являются: уникальный идентификатор сущности, название сущности, описание сущности и т.д. Предметными являются ключи, хранящие значения свойств, характерных для конкретной предметной области, к которой принадлежит объект.

Для реализации модели  $I$  спроектирована совокупность программных классов, использование которых позволяет строить информационные классы прикладной области. Упрощенная структура модели показана на рис. 1.

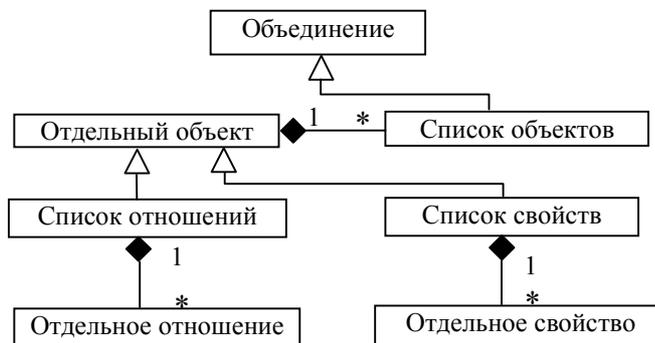


Рис. 1

За основу построения модели  $I$  взята объектно-ориентированная парадигма. Информация, предназначенная для обмена между компонентами системы, преобразуется к виду, представляющему собой список объектов (класс „Список объектов“) и иерархию их свойств (класс „Список свойств“). Связи между объектами описываются с использованием списка отношений (класс „Список отношений“). Все элементы модели объединяются с помощью класса

„Объединение“. Подробное описание структуры единой модели информационного взаимодействия приведено в работе [6].

Полученная модель представления данных позволяет осуществлять обмен любыми данными между элементами корпоративной ИС.

**Оценка стоимости построения и использования модели информационного взаимодействия.** Исходя из назначения модели информационного взаимодействия к основным операциям, выполняемым в процессе ее использования, можно отнести операции доступа к данным. К таким операциям, в первую очередь, относится поиск элемента модели и добавление элемента в процессе построения модели.

Стоимость\* построения и использования модели  $I$  определяется числом ( $N$ ) уровней ее иерархической структуры и количеством элементов ( $n$ ) уровня [7, 8]. На рис. 2 и 3 графически показаны соответственно зависимость стоимости ( $V$ ) поиска элемента модели и зависимость стоимости ее построения ( $V'$ ) от числа уровней для моделей, содержащих 500, 700, 900, 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 элементов.

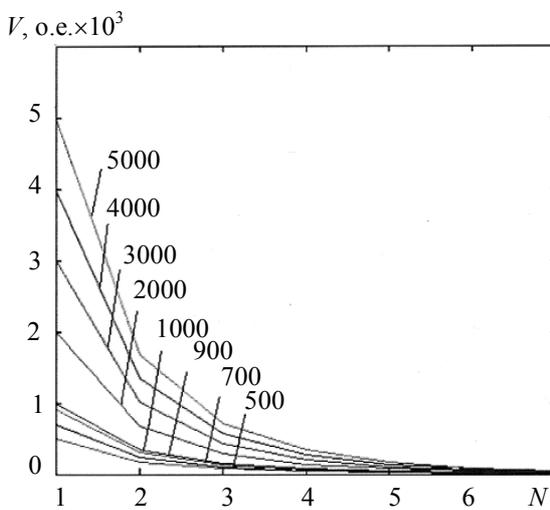


Рис. 2

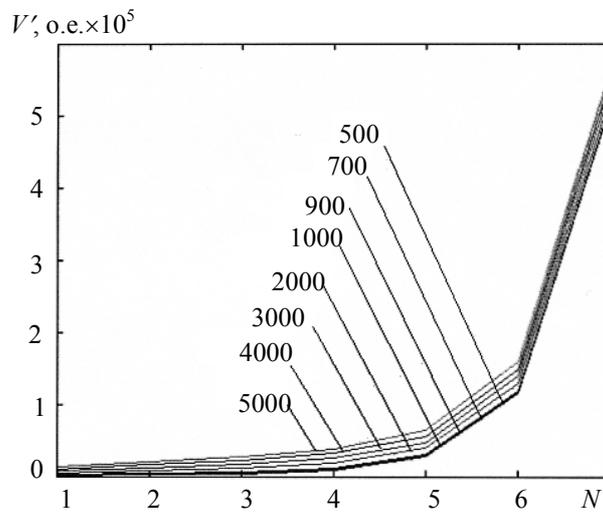


Рис. 3

Как видно из рис. 2, для модели, содержащей до 1000 элементов, достаточно низкая стоимость поиска обеспечивается при  $N = 3$ , а с увеличением количества элементов — при  $N \geq 4$ ; при  $N > 7$  стоимость поиска практически не зависит от числа элементов модели.

В соответствии с графиками, представленными на рис. 3, при увеличении числа уровней модели происходит резкое увеличение стоимости ее построения: наибольший рост стоимости наблюдается при  $N > 4$  и  $n > 1000$ .

В результате оценки стоимости построения и использования модели информационного взаимодействия установлено следующее:

- не рекомендуется построение одноуровневой модели при любом количестве ее элементов, что связано с высокой стоимостью использования модели;
- нецелесообразно использовать многоуровневую модель при  $N > 4$  и любом  $n$ , что связано с высокой стоимостью ее построения;
- при  $n < 1500$  наиболее эффективной является трехуровневая модель, а при  $n > 1500$  — четырехуровневая.

Полученные результаты рекомендуется использовать при выборе оптимальной структуры модели взаимодействия элементов корпоративной информационной системы.

\* Под стоимостью понимается совокупность ресурсов (материальных, человеческих, временных и т.п.), затрачиваемых на реализацию функций модели; расчет стоимости производится в относительных единицах.

**Общая методика приведения информации к единой модели ее представления.** Исходная модель данных любой подсистемы может быть представлена как конечное множество элементов  $H = H^O \cup H^P$ , где  $H^O$  — множество элементов, содержащих информацию об объектах,  $H^P$  — множество элементов, содержащих информацию о свойствах объектов.

Процесс приведения информации к единой модели ее представления (модели  $P$ ) включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Формирование подмножества полей, содержащих информацию об объекте (объектах).

Этап 2. Формирование подмножества полей, содержащих информацию о свойствах объекта (объектов).

Этап 3. Определение соответствия объектов и их свойств, в рамках которого для объектов устанавливается отношение „обладать свойством“, а для свойств — отношение „принадлежать объекту“.

Этап 4. Построение единой модели на основе сформированных подмножеств объектов, свойств объектов и установленных отношений.

При построении модели  $P$  предусмотрены следующие действия:

— построение множества элементов  $E$  модели на основе сформированного множества объектов; для преобразования  $l$ -го элемента  $h$  множества  $H^O$  используется функция  $f_1$ :

$$e_i = f_1(h_l), \quad h_l \in H^O, \quad e_l \in E;$$

— построение множества элементов  $K$  модели на основе сформулированного множества свойств объектов; для преобразования  $u$ -го элемента множества  $H^P$  используется функция  $f_2$ :

$$k_i = f_2(h_u), \quad h_u \in H_i^P.$$

Функции преобразования определяются типом данных, над которыми производится преобразование.

**Анализ метода взаимодействия элементов корпоративной ИС.** Применение единой модели информационного взаимодействия позволяет существенно снизить стоимость интеграции компонентов системы по сравнению с существующими методами, что достигается за счет описания предметной области на основе известных принципов объектно-ориентированного подхода.

Выбор оптимальной структуры единой информационной модели базируется на новых правилах, разработанных на основе оценок стоимости построения и использования модели в зависимости от ее параметров (числа уровней иерархической структуры и числа элементов на каждом уровне).

Оригинальность методики приведения информации к единой модели ее представления состоит в разработке новых правил сведения любой информационной модели к линейному множеству с сохранением ее структурных свойств. Такой подход позволяет прогнозировать ресурсные затраты на формирование единого информационного пространства для успешного взаимодействия элементов корпоративной ИС.

Рассмотренный метод применен в СПИИРАН при реализации функциональной системы освещения обстановки в составе интегрированной автоматизированной системы управления [9], при реализации оперативно-тактического тренажера [10] и при разработке концепции развития корпоративной ИС ООО „Ямбурггаздобыча“ [11].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платформа интеграционного программного обеспечения WebSphere [Электронный ресурс]: <<http://www.ibm.com/developerworks/websphere/zones/businessintegration/bigpicture.html>>.
2. Программа интеграции данных с открытым исходным кодом [Электронный ресурс]: <<http://www.talend.com/index.php>>.
3. *Dieng R., Hug S.* Comparison of “personal ontologies” represented through conceptual graphs // Proc. of the 13th ECAI. Brighton (UK), 1998. P. 341—345.
4. *Madche A., Staab S.* Measuring similarity between ontologies // Proc. of the 13th Intern. Conf. on Knowledge Engineering and Management (EKAW—2002), Sigüenza, Spain, 2002, Oct. Springer-Verlag, 2002.
5. *Euzenat J., Shvaiko P.* Ontology Matching. Berlin Heidelberg (DE): Springer-Verlag, 2007. P. 333.
6. *Панькин А. В.* Информационная система как основа поддержки принятия решения // Инновации. 2003. № 8(25). С. 61—64.
7. *Вирт Н.* Алгоритмы + структуры данных = программы. М.: Мир, 1985. 406 с.
8. *Кнут Д.* Искусство программирования для ЭВМ. Т. 3. Сортировка и поиск. М.: Мир, 1976. 736 с.
9. Программно-алгоритмический комплекс (ПАК) автоматизации процесса управления функциональной системой освещения обстановки интегрированной системы управления ВМФ (шифр „Алеврит“) [Описание программно-алгоритмического комплекса]. СПб: ЗАО „СПИИРАН — НТБВТ“, 2007.
10. Методика использования оперативно-тактического тренажерного комплекса для проведения учебных занятий практического обучения в системе образовательного процесса и мероприятий оперативной подготовки ВМФ в Военно-морской академии. СПб: ЗАО „СПИИРАН — НТБВТ“, 2009.
11. Концепция развития корпоративной информационной системы ООО „Ямбурггаздобыча“: Пояснительная записка к техническому заданию. — СПб: ЗАО „СПИИРАН — НТБВТ“, 2007. 104 с.

*Сведения об авторе*

*Андрей Владимирович Панькин* — СПИИРАН, лаборатория объектно-ориентированных геоинформационных систем; ст. науч. сотрудник; E-mail: [pankin@oogis.ru](mailto:pankin@oogis.ru)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

УДК 681.3.06

В. В. МИХАЙЛОВ, И. С. СЕЛЯКОВ, Т. Н. СОЛОВЬЕВА

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОРЕСУРСОВ

Рассмотрены особенности биоресурсов как объектов агентного моделирования. Представлен обзор основных подходов к построению многоагентных систем. Приведены примеры разработки моделей на базе стандартного пакета моделирования и специально разработанного симулятора.

**Ключевые слова:** биоресурсы, многоагентная система, архитектура интеллектуального агента, пакеты моделирования, симуляторы.

**Введение.** Многоагентный подход является относительно новым и чрезвычайно быстро развивающимся направлением имитационного моделирования. Подход состоит в представлении компонентов моделируемой системы в виде отдельных, относительно независимых объектов — интеллектуальных агентов, каждый из которых имеет свои цели и задачи. Агенты имеют возможность взаимодействовать друг с другом и окружающей средой, обмениваться

информацией для достижения общих целей. Каждый агент обладает собственными вычислительными ресурсами и действует параллельно во времени с другими агентами.

В методологии системного моделирования локальные компоненты, как правило, не имеют собственных целей функционирования вне глобальной цели развития системы в целом. Задача моделирования, таким образом, заключается в определении пути развития системы, когда внутрисистемные связи и параметры известны. При агентном подходе локальные компоненты являются относительно независимыми сущностями, а глобальные закономерности развития системы в целом определяются свойствами компонентов и их взаимодействием на локальном уровне.

Агентный подход с соответствующими средствами программной поддержки может применяться при произвольном количестве подсистем — интеллектуальных агентов. Однако в наибольшей мере его преимущества проявляются в случае, когда моделируемая система состоит из достаточно большого количества однородных по свойствам, относительно независимых компонентов. Именно в этом случае можно ожидать появления новых свойств и новых знаний о системе в целом.

**Биоресурсы как объект моделирования.** В литературе по природопользованию биоресурсы определяются как источники и предпосылки получения людьми необходимых материальных и духовных благ, заключенных в объектах живой природы. В широком плане к биоресурсам относят все средообразующие объекты биосферы — продуценты, консументы и редуценты с заложенной в них генетической информацией. В настоящей статье, для конкретности, ограничимся рассмотрением массовых промысловых видов крупных наземных млекопитающих (например, оленей, лосей, сайгаков и т.п.). Известно, что биологические виды существуют в форме популяций. Численность, половозрастная и пространственная структура популяции складываются под влиянием внутривидовых и внешних факторов. К последним относятся погодно-климатические условия, кормовая база, пищевые конкуренты и хищники, антропогенные воздействия. Как природный ресурс популяция может быть объектом промысла или спортивной охоты (лова). Структурными компонентами популяций являются семьи, стаи, стада, группировки животных. Эти компоненты характеризуются высокой сезонной изменчивостью. Тем не менее именно эти компоненты с учетом половозрастного состава, размещения в ареале, сроков и путей миграций определяют пространственную структуру популяции. Разработка имитационных моделей пространственного размещения и миграций животных чрезвычайно важна с ресурсных позиций. Однако общие закономерности динамики пространственной структуры популяций в биологии недостаточно исследованы и слабо формализованы. Именно здесь в наибольшей степени может быть полезен агентный подход, использующий локальные свойства объектов для выявления общих закономерностей. В качестве агентов могут служить отдельные особи или более крупные относительно стабильные образования — стада животных как компоненты группировок, группировки как компоненты популяции.

Целями многоагентного моделирования применительно к вопросам природопользования могут быть: проверка гипотез о закономерностях функционирования биосистем; исследование возможности устойчивого использования биоресурсов с учетом пространственного аспекта и адаптивных свойств особей; оптимизация промысловой системы с учетом пространственного размещения и миграций группировок животных и др.

В связи с многообразием пакетов моделирования и вариантов архитектур агентов построение агентных систем представляется достаточно сложной задачей, требующей проведения предварительного анализа возможных подходов и имеющихся программных средств.

**Архитектуры интеллектуальных агентов.** В современной теории мультиагентного моделирования выделяют четыре основные архитектуры интеллектуальных агентов [1, 2]:

— *логическую архитектуру*, где принятие решений реализовано на основе логических правил;

— *реактивную архитектуру*, где принятие решений реализовано за счет установления прямых связей между состояниями и действиями;

— *архитектуру BDI (belief—desire—intention)*, где принятие решений основано на манипуляции структурами данных, включающих представление агента (belief), его цели (intentions) и пути достижения целей (desires);

— *гибридную архитектуру*, где принятие решений реализовано через несколько программных слоев, каждый из которых представляет отдельный уровень абстракции.

Агентов, которые используют только точное представление картины мира в символьной форме, а решения (например, о действиях) принимают на основе формальных рассуждений и использования методов сравнения по образцу, принято определять как *делиберативные* (от англ. deliberation — обсуждение, рассуждение). Применительно к таким агентам используется термин „*логическая архитектура*“ [3]. Блок принятия агентом решений проверяет выполнимость логических утверждений, используя текущие данные базы знаний об окружающей среде. На основе результатов проверки выбирается нужное решение. Логическая архитектура проста и понятна, но может оказаться неэффективной ввиду сложности формирования модели среды в символьном виде.

Принципы *реактивной архитектуры* были выдвинуты Бруксом [4] как альтернативный подход к логической архитектуре. Архитектура Брукса основывается на двух принципах. Первый принцип заключается в том, что каждому состоянию окружающей среды, воспринимаемому блоком наблюдения, соответствует определенное действие. В отличие от делиберативного агента, реактивный агент не сохраняет данные о среде в базе знаний. Решение принимается мгновенно, исходя из входных данных. Второй принцип заключается в представлении поведения агента в виде отдельных уровней. Каждый уровень имеет определенный приоритет. При получении агентом входного сигнала сначала решаются наиболее важные и приоритетные задачи. К недостаткам реактивных агентов можно отнести их узкую специализацию для систем реального времени и невозможность применения в случае, когда от агента требуется сложный анализ целей, выбор поведения и прогнозирование ситуации.

*Архитектура BDI* [5, 6]. Поведение BDI-агентов напоминает итеративный процесс мышления человека при выборе нужного действия для достижения поставленных целей. Агенты с такой архитектурой способны не только оперативно реагировать на происходящее вокруг, но и анализировать свои цели и выбирать оптимальное поведение для их достижения. В отличие от логической и реактивной, BDI-архитектура позволяет агенту действовать „более интеллектуально“. К недостаткам можно отнести сложность реализации архитектуры и высокие требования к вычислительной способности отдельных агентов.

Попытки соединить классический логический и реактивный подходы привели к появлению разнообразных *гибридных архитектур* [7, 8]. Для реализации нескольких видов поведения агент представляется несколькими подсистемами, каждая из которых отвечает за определенный вид поведения. Основная проблема реализации гибридной архитектуры — создание адекватного поставленной агенту задаче и эффективного блока управления отдельными подсистемами для координации их действий и выбора общего решения.

**Пакеты моделирования многоагентных систем.** Среди многообразия современных пакетов агентного моделирования сложно выделить какой-то один универсальный и эталонный. Выбор пакета должен быть обусловлен типом решаемой задачи и квалификацией разработчика системы.

Пакет SWARM [9] позволяет моделировать сложные многоагентные системы, которые включают большое количество агентов. Для описания агентов используется внутренний язык наподобие языка С. Агенты имеют логическую архитектуру, что обеспечивает прозрачность

алгоритмов их поведения. Основной недостаток этого пакета — необходимость освоения нового языка программирования разработчиком системы.

Система моделирования и анализа мультиагентных систем Taems [10] основана на структуре задач и отношений между ними. Ее главное преимущество — возможность построения сложных интеллектуальных агентов, способных принимать решения для достижения поставленных целей, и наличие встроенных графических редакторов для представления внутренних блоков агента и модели его поведения. Однако система плохо документирована и имеет много ошибок в реализации, что усложняет действия разработчика.

Система AnyLogic [11] является многофункциональным графическим пакетом имитационного моделирования. Главное преимущество AnyLogic — широкие возможности по графическому представлению модели, которая создается путем графического соединения различных блоков из множества внутренних библиотек и дополнительных вставок на языке Java. Простота разработки моделей сопровождается, однако, недостаточной универсальностью пакета.

Инструментальная среда MASDK [12], разработанная в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН, предназначена для построения прикладных многоагентных систем. Главной особенностью данной среды является поддержка полного цикла разработки агентных систем, начиная с этапа описания предметной области и заканчивая моделированием с участием агентов с заданной структурой и поведением. Описание этой среды осуществляется с помощью специального языка AFW, созданного на основе XML. Для удобства разработчика в среде имеется набор графических редакторов, упрощающих процесс описания системы и ее структуры. В системе имеется так называемый „генератор агентов“, который на основе описания системы на языке AFW выполняет генерацию программного кода на языке C++.

Пакет JADE (Java Agent Development Framework) [13, 14] полностью поддерживает стандарт для мультиагентных систем FIPA [15], который является передовым в области многоагентного моделирования. Пакет написан на языке Java. Он позволяет создавать агентов, поддерживать их жизненный цикл, назначать агентам задачи, определять их поведение и т.п. Таким образом, пакет JADE реализует парадигму так называемого агентно-ориентированного программирования. В отличие от среды MASDK пакет JADE не дает возможности описать предметную область, а позволяет лишь создать реализацию агентной системы.

Создание моделей на языке Java требует от разработчика хороших навыков программирования, но при этом он не ограничен в своих возможностях и может создать гибкую эффективную систему с собственным графическим интерфейсом. Важным достоинством языка Java является многоплатформенность. Благодаря поддержке технологии RMI имеется возможность проводить распределенное моделирование многоагентной системы в компьютерной сети. При этом никакой дополнительной работы от программиста не требуется.

**Формирование агентной модели и интерфейс пользователя. Стандартные пакеты моделирования.** Наиболее простой вариант построения агентной модели состоит в непосредственном использовании возможностей стандартных пакетов моделирования. В зависимости от квалификации пользователь самостоятельно или с участием системного аналитика-программиста выполняет разработку модели и проводит имитационные эксперименты, используя средства программной поддержки и интерфейс выбранного пакета моделирования.

В качестве примера рассмотрим построение агентной модели поведения стадных животных с использованием пакета AnyLogic. Для моделирования многоагентных систем в пакете предусмотрено создание большого количества экземпляров классов, которые способны функционировать одновременно. Для удобства задания поведения объектов используются карты состояний и таймеры. Систему можно представить на экране в виде анимации. Разработчик модели может использовать все возможности объектно-ориентированного программирования модифицированного языка Java. Однако для придания модели более прозрачной

структуры код программы разбивается на блоки, а назначение переменных, задание связей и другие стандартные действия осуществляются графическими средствами. Рассмотрим построение агентной модели поведения стадных животных в пакете AnyLogic.

Объектом моделирования является стадо животных [16]. В зимний период стадо перемещается в пределах ограниченной области и состоит из 20—40 животных, находящихся в пределах видимости (менее 200 м). Бюджет времени оленей содержит 3 фазы: кормление, отдых и перемещение.

Фаза кормления продолжается 0,5—1,5 ч. При кормлении происходит циклическая смена двух процессов.

1) Фиксация животного в точке для раскапывания лунки в снегу и кормления (от 2 до 10 мин). При этом в одной точке может находиться только одно животное.

2) Микроперемещение на 10—15 м к новой фиксированной точке (около 5 мин). Направление перемещения — случайное. При перемещении животные оценивают расстояние до соседей в стаде. Если животное отходит на расстояние более 100 м, то вероятность движения по направлению от стада уменьшается, а вероятность движения по направлению к стаду увеличивается. Животное, отошедшее далее чем на 200 м, теряет связь со стадом. При этом оно может войти в зону притяжения другого стада и соединиться с ним.

Этап отдыха после кормления длится 1—2 ч. Постепенно животные прекращают кормление и ложатся.

Третий этап — перемещения. Он начинается после отдыха, но может быть и при кормлении. Здесь проявляется эффект лидерства. Одна из особей встает и начинает движение в некотором направлении. Затем начинают постепенно вставать другие животные и двигаться за лидером. Движение в результате происходит по общей тропе. В следующем цикле лидером может быть другая особь. После перемещения вновь начинается фаза кормления.

Для моделирования описанной системы в пакете AnyLogic было создано два класса объектов: *Herd* (стадо) и *Deer* (олень). Каждый объект класса *Herd* включает в себя некоторое число объектов класса *Deer*. Это число выбирается между 20 и 40 случайным образом каждый раз при запуске модели. Для задания поведения стада и особи для каждого класса были сформированы карты состояний (стейтчарты) и ряд функций для определения координат животного и его ближайших соседей.

Стейтчарт стада содержит два состояния: *stop* (стоп) и *go* (перемещение). Изначально стадо находится в состоянии *stop*. По истечении тайм-аута (2,5 ч) объект переходит в состояние *go*, и происходит случайный выбор лидера. В состоянии *go* случайно выбирается направление перемещения стада и лидеру посылается сигнал „вперед“. Через 90 мин (время, задаваемое согласно тайм-ауту) происходит возвращение стада в состояние *stop* и лидеру посылается сигнал „стоп“.

Поведение отдельного оленя описывается более сложной картой состояний. Она содержит гиперсостояние *eat* (фаза кормления) и два состояния — *rest* (отдых) и *go*. Гиперсостояние *eat* включает в себя состояния *stop* и *walk* (микроперемещение).

Для описания действий животных служат встраиваемые в графическую структуру модели вставки на языке Java.

Для обеспечения связи между соседними особями создана функция *Nbh(m)* (от англ. *neighbourhood* — соседство), используемая для поиска ближайшего соседа.

Переход между состояниями *stop* и *walk* осуществляется в соответствии со случайными тайм-аутами. Переход из состояния *eat* в состояние *rest* также осуществляется согласно тайм-ауту — случайному числу между 60-й и 90-й минутами. Переход из состояния *rest* в состояние *go* и из состояния *go* в состояние *eat* осуществляется по сигналам „вперед“ и „стоп“ соответственно. Кроме того, животное в состоянии *go* каждые 5 минут посылает ближайшему отдыхающему соседу сообщение „вперед“.

Таким образом, путем организации связей между особями с помощью сигналов реализуется стадность. В состояниях, соответствующих движению (walk и go), происходит пересчет текущих координат особи по специально разработанным алгоритмам.

**Симуляторы.** Если возможности стандартных пакетов недостаточны для эффективного решения поставленной задачи, то возникает задача разработки симулятора. Симуляторы служат для проведения имитационных экспериментов специалистами конкретной предметной области и разрабатываются на базе тех или иных пакетов моделирования, а также дополнительных программных средств для задания моделей окружающей среды и отображения размещения агентов. Для эффективного решения прикладных задач симулятор должен иметь удобный пользовательский интерфейс.

В качестве примера рассмотрим симулятор, разработанный авторами для моделирования природно-хозяйственной системы [17]. Ресурсной базой является популяция животных, мигрирующих в пределах ареала. Пути миграций зависят от кормовой базы и погодноклиматических условий. Использование ресурса заключается в изъятии части животных. Для отстрела животных организуются стационарные и мобильные промысловые пункты. Цель моделирования состоит в выборе мест размещения промысловых пунктов в зависимости от путей миграций группировок животных. В качестве агентов были выбраны отдельные стада как компоненты группировок животных. Второй тип агентов — стационарные и мобильные промысловые пункты. Была выбрана логическая архитектура многоагентной системы, подразумевающая наличие базы данных о состоянии агентов и окружающей среды.

Симулятор разработан с использованием средств пакета JADE ввиду отмеченных ранее достоинств пакета (гибкости, поддержки стандарта FIPA, многоплатформенности). Интерфейс симулятора содержит главное окно, которое включает панель управления моделированием, меню для задания параметров моделирования и рабочую область. Рабочая область служит для отображения перемещения агентов в пространстве в режиме настройки параметров агентной среды.

В режиме моделирования симулятор работает с геоинформационной системой ArcGIS [18]. ArcGIS служит для задания и визуализации модели окружающей среды, а также визуализации расположения агентов на конкретной территории с точной географической привязкой, обеспечивая графический интерфейс симулятора. Симулятор производит вычисления и обновляет данные о размещении агентов с использованием модели среды, полученной геоинформационной системой. Обмен данными в интегрированной системе осуществляется в реальном времени через Shape-файл.

**Заключение.** Агентный подход позволяет создать распределенную динамическую систему, основанную на взаимодействии локальных агентов с учетом их территориального размещения, половозрастных различий и, возможно, их генетической неоднородности. Учет этих свойств позволяет увеличить степень адекватности предлагаемой модели реальной природно-хозяйственной системе. В агентном подходе постулируется, что глобальные закономерности функционирования системы выводятся из свойств ее локальных компонентов. Однако вопрос о том, какое количество агентов должна содержать система и какими свойствами должны обладать агенты, не является до конца решенным ни в теории агентного моделирования, ни в теории систем.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О–2.3/03).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nwana H. S. Software agents: An overview // Knowledge Engineering Review. 1996. Vol. 11, N 3. P. 1—40.

2. Weiss G. Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. Cambridge, MA, 2001. P. 36—61
3. Genesereth M. R., Nilsson N. Logical Foundations of Artificial Intelligence. San Mateo, CA, 1987. 416 p.
4. Brooks R. A. A robust layered control system for a mobile robot // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986. P. 14—23.
5. Konolige K. A Deduction Model of Belief. San Mateo, CA, 1986. 230 p.
6. Rao A. S., Georgeff M. P. Modeling rational agents within a BDI-architecture // Proc. of Knowledge Representation and Reasoning. San Mateo, CA, 1991. P. 473—484.
7. Ferguson I. A. TouringMachines: An Architecture for Dynamics, Rational, Mobile Agents. Cambridge, MA, 1992. 205 p.
8. Muller J. A Cooperation Model for Autonomous Agents. Berlin, 1997. P. 245—260.
9. SWARM Specification [Электронный ресурс]: <<http://www.swarm.org>> (по состоянию на 01.11.2007).
10. Horling B., Lesser V. The Taems White Paper / Univ. of Massachusetts. 2004. 50 p.
11. Карпов Ю. Г. Введение в моделирование с использованием среды AnyLogic [Электронный ресурс]: <<http://www.xjtek.com>> (по состоянию на 01.12.2006).
12. Городецкий В. И., Карасев О. В. Технология разработки прикладных многоагентных систем в инструментальной среде MASDK // Тр. СПИИРАН. 2006. Т. 1, вып. 3. С. 11—32.
13. JADE Programmer's Guide [Электронный ресурс]: <<http://jade.tilab.com>> (по состоянию на 20.02.2007).
14. JADE Administrator's Guide [Электронный ресурс]: <<http://jade.tilab.com>> (по состоянию на 20.02.2007).
15. FIPA Specification [Электронный ресурс]: <<http://drogo.csel.stet.it/fipa/>> (по состоянию на 01.02.2007).
16. Михайлов В. В., Колпацников Л. А. Особенности пространственно-временной структуры таймырской популяции диких северных оленей // Актуальные проблемы природопользования на Крайнем Севере: Сб. Новосибирск: ИПЦ „Юпитер“, 2004. С. 18—34.
17. Михайлов В. В., Селяков И. С. Использование мультиагентного симулятора при моделировании распределенных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 69—73.
18. ArcGIS Desktop [Электронный ресурс]: <[http://esri.com/software/arcgis/about/desktop\\_gis.html](http://esri.com/software/arcgis/about/desktop_gis.html)> (по состоянию на 10.04.2008).

#### **Сведения об авторах**

- Владимир Валентинович Михайлов** — д-р техн. наук, доцент; СПИИРАН, кафедра вычислительных систем и сетей; E-mail: mwwcari@mail.ru
- Игорь Сергеевич Селяков** — аспирант; СПИИРАН, кафедра вычислительных систем и сетей; E-mail: seliakov@mail.ru
- Татьяна Николаевна Соловьева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра вычислительных систем и сетей; E-mail: famsol@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
09.07.10 г.

## SUMMARY

P. 7—16.

### INTERDISCIPLINARY APPROACH TO ESTIMATION AND ANALYSIS OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS EFFICIENCY

Basic factors and estimation of up-to-date information technologies impact on functioning of existing and perspective are considered. New methodological approaches to the problems of analysis and synthesis of effective information technologies and systems are proposed.

**Keywords:** computer-aided and information systems, multiobjective estimation and efficiency analysis, logistical complex.

#### *Data on authors*

- Oleg V. Maidanovich* — Cand. Techn. Sci., Associate Professor; Plesetsk Cosmodrome, Mirnyi; Cosmodrome Master; E-mail: sid.sn@yandex.ru
- Mikhail Yu. Okhtilev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Close Corporation “Special Design Department Orion”, St. Petersburg; Deputy Chief Designer; E-mail: oxt@mail.ru
- Natalia N. Kussul* — Dr. Techn. Sci., Professor; National Space Agency of Ukraine, Kiev; Deputy Director
- Boris V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Deputy Director for R&D; E-mail: sokol@iias.spb.su
- Euginy G. Tsivirko* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Administration, Informatization and Communication Committee of St. Petersburg Government; Head of Committee; E-mail: kis@gov.spb.ru
- Rafael M. Yusupov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Director; E-mail: yusupov@iias.spb.su

P. 17—20.

### PROSPECTIVE CHARACTERISTICS OF DIGITAL DATA TRANSMISSION CHANNEL

Classification of digital data transmission channels is presented. Structure of unary digital channel is analyzed. Restrictions imposed on channel operation are derived. Progress trend in digital communication channel development are considered.

**Keywords:** channel, network capacity, source, receiver, container, bit flow.

#### *Data on author*

- Sergey V. Kuleshov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Research Activities Automation; E-mail: kuleshov@iias.spb.su

**P. 20—23.****AUTOMATED SYSTEM FOR INFORMATION SUPPORT OF DECISION MAKING IN REAL-TIME CONTROL OVER SPACE ROCKET TECHNIQUE STATE**

Systems analysis of space complexes testing results is presented. Novel approaches to implementation of modern information technology are proposed for real-time monitoring of complex technical objects.

**Keywords:** information support of decision-making, information system, space rocket complex, space tools monitoring, real-time.

*Data on authors*

- Viktor A. Kargin* — Cand. Techn. Sci.; Close Corporation “Special Design Department Orion”, St. Petersburg; E-mail: vic\_kargin@mail.ru
- Oleg V. Maidanovich* — Cand. Techn. Sci., Associate Professor; Plesetsk Cosmodrome, Mirnyi; Cosmodrome Master; E-mail: sid.sn@yandex.ru
- Mikhail Yu. Okhtilev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Close Corporation “Special Design Department Orion”, St. Petersburg; Deputy Chief Designer; E-mail: oxt@mail.ru

**P. 24—26.****APPLICATION OF WEB-SERVICES TO MEDICAL DIAGNOSIS**

The problem of making a medical diagnosis is discussed on the base of semantic analysis of information on the patient along with its ontological modeling. The possibility of SWeb platform application for development of service-oriented architecture is considered.

**Keywords:** ontological modeling, medical diagnostics, web-services.

*Data on authors*

- Alexander S. Lvov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information and Computer Systems; E-mail: vvi@iias.spb.su
- Roza R. Fatkueva* — Cand. Techn. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information and Computer Systems; E-mail: rikki2@yandex.ru

**P. 27—32.****INVESTIGATION ON SAFETY OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS**

An analysis of safety characteristics of complex technical object is performed in the frames of the concept of structure genome. Significance and contribution from an event resulting in a breakdown are taken as the characteristics under consideration.

**Keywords:** monotonic and nonmonotonic systems, structure genome, safety indices, P-net, N-net.

*Data on authors*

- Alexander N. Pavlov* — Cand. Techn. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information and Computer Systems; E-mail: pavlov62@list.ru
- Sergey A. Osipenko* — Advanced Student; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Control over Space Vehicles, St. Petersburg; E-mail: fon\_vakano@mail.ru

P. 32—35.

### APPLICATION OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES TO RISK ASSESSMENT OF DISASTROUS EFFECTS

A novel complex approach to the problem of risk assessment of disastrous effects (e.g., tsunami) on the base of geoinformation technologies is considered. The proposed method makes it possible to relate parameters of tsunami source, propagation medium, and shore infrastructure to disastrous effects, and to compose dynamic charts of the risks.

**Keywords:** disaster, risk assessment method, risk chart.

#### *Data on author*

*Oksana V. Smirnova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Object-Oriented Geoinformation Systems; E-mail: sov@oogis.ru

P. 36—41.

### COMBINED PROTECTION OF SOFTWARE FROM UNAUTHORIZED MODIFICATIONS

An approach is proposed to creation of a combined mechanism of software protection against unauthorized changes on the base of remote confidence principles. The approach ensures a compromise between the summarized protection level and the mechanism scalability.

**Keywords:** program protection, unauthorized modification, remote confidence principles, attacks on programs and protection from the attacks.

#### *Data on authors*

*Vasily A. Desnitsky* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Computer Safety Problems, Junior Scientist; E-mail: desnitsky@comsec.spb.ru

*Igor V. Kotenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Computer Safety Problems; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru

P. 42—45.

### INVESTIGATION OF BOTNETS AND DEFENSE MECHANISMS ON THE BASE OF SIMULATION MODELING

An approach is proposed to investigation of botnets and defense mechanisms against their impact. The approach is based on application of simulation modeling methods. A general formalistic model of botnet and defense mechanism, modeling environment, and experimental results are presented.

**Keywords:** botnets, attack model, defense mechanism model, imitation modeling, agent-oriented modeling.

#### *Data on authors*

*Igor V. Kotenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Computer Safety Problems; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru

*Alexey M. Konovalov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Computer Safety Problems; E-mail: konovalov@comsec.spb.ru

*Andrey V. Shorov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Computer Safety Problems; E-mail: ashorov@comsec.spb.ru

P. 46—55.

### POLYMODEL DESCRIPTION OF INHERENT INFORMATION SYSTEM MODERNIZATION PROCESS ON THE BASE OF SERVICE-ORIENTED APPROACH

A polymodel description of modernization process for inherent information system is presented. The description is supposed to be used in multiobjective assessment of economic and technical-technological effectiveness of development and employment of corresponding information technologies.

**Keywords:** dynamic models of program control over modernization, multiobjective assessment of effectiveness.

#### *Data on authors*

- Evelio Antonio E. Dilow-Raginya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling
- Mikhail A. Kolpin* — Advanced Student; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Control over Space Vehicles, St. Petersburg;  
E-mail: kolpin-ma@mail.ru
- Kirill L. Grigoriev* — Mozhaysky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Control over Space Vehicles, St. Petersburg; Lecturer
- Boris V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Deputy Director for R&D; E-mail: sokol@iias.spb.su

P. 56—61.

### METHOD OF TRAFFIC ROUTING IN INFORMATION-COMMUNICATION HETEROGENEOUS NETWORK

A mathematical model is presented for control over network in the case of diverse requirements to routing and joint application of various path determination algorithms. A method is proposed for control over network routing in heterogeneous information-communication network of arbitrary structure. The method allows for effective employment of the net resource and reduction in the number of traffic lockouts and delays.

**Keywords:** routing, traffic control, resource planning, control over information links.

#### *Data on authors*

- Vyacheslav A. Zelentsov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling;  
E-mail: zvarambler@rambler.ru
- Eugeny G. Tsvirko* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Administration, Informatization and Communication Committee of St. Petersburg Government; Head of Committee;  
E-mail: kis@gov.spb.ru
- Alexey V. Chukarin* — Cand Phys.-Math. Sci., Associate Professor; Peoples' Friendship University of Russia, Department of Telecommunication Systems, Moscow;  
E-mail:chukarin@yandex.ru

**P. 61—66.****OPTIMIZATION OF QUEUEING NETWORK PARAMETERS ON THE BASE OF COMBINED APPLICATION OF ANALYTICAL AND SIMULATION MODELS**

Methods are considered of optimization of parameters of queueing network described with the use of both analytical and simulation models.

**Keywords:** simulation model, analytical model, theory of queues, digital optimization with restrictions, homogeneous system, queueing network.

*Data on authors*

- Sergey V. Kokorin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling; E-mail: kokorins@rambler.ru
- Yury I. Ryzhikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling; E-mail: ryzhbox@yandex.ru

**P. 67—73.****FORMULATION OF THE PROBLEM OF PLAN OPERATION CORRECTION OF CORPORATIVE INFORMATION SYSTEM WITH THE USE OF POSITION OPTIMIZATION METHOD**

The problem is considered of plan operation correction of corporative information system. Method of position optimization is proposed to be applied to solve the problem. The method allows for real time correction of the system plan of operation.

**Keywords:** dynamic model of program control, position optimization method, corporative information system.

*Data on authors*

- Inna V. Solovieva* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling; Junior Scientist; E-mail: isolovyeva@mail.ru
- Oleg I. Semenov* — Cand Techn. Sci.; United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk
- Boris V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Deputy Director for R&D; E-mail: sokol@iias.spb.su

**P. 74—78.****METHOD OF COORDINATION FOR CORPORATIVE INFORMATION SYSTEM ELEMENTS**

Approaches to the problem of elements coordination in corporative information system are considered on the base of integrated information model. Novel structures are proposed and methods of assessment of the cost of the system development and employment.

**Keywords:** corporative information system, informational interaction, representation of information, integrated model.

*Data on author*

- Andrey V. Pankin* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Laboratory of Object-Oriented Geoinformation Systems; Senior Scientist; E-mail: pankin@oogis.ru

**P. 78—84.**

### **APPLICATION OF MULTIAGENT APPROACH TO BIOLOGICAL RESOURCE MODELING**

Peculiarities of biological resources as objects of agent modeling are considered. Basic approaches to development of multiagent systems are reviewed. Examples are presented of models developed on the base of a standard modeling program package and a specially devised simulator.

**Keywords:** biological resource, multiagent system, intellectual agent architecture, modeling program package, simulator.

#### *Data on authors*

- Vladimir V. Mikhailov* — Dr. Techn. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Department of Computer Systems and Networks; E-mail: mwwcari@mail.ru
- Igor S. Selyakov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Department of Computer Systems and Networks; E-mail: seliakov@mail.ru
- Tatiana N. Solovieva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Systems and Networks; E-mail: famsol@yandex.ru