

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 55

НОЯБРЬ 2012

№ 11

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК  
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ</b>	
Павлов А. Н. Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов.....	7
Майданович О. В. Динамическая интерпретация процессов управления жизненным циклом сложных объектов .....	13
Кокорин С. В., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами .....	17
Иванов В. О. Оптико-электронное устройство автоматической посадки автономного летающего робота.....	23
Титов В. В. Алгоритм управления податливым движением манипулятора с упругими элементами в шарнирных сочленениях .....	29
Латухина Е. А. Информационная система хранения и обработки гастроэнтерографических данных .....	34
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЧИ</b>	
Карпов А. А., Кипяткова И. С. Методология оценивания работы систем автоматического распознавания речи .....	38
Ронжин А. Л., Будков В. Ю. Анализ современных методов и систем диаризации дикторов .....	43
Прищепа М. В., Баранов К. Ю. Особенности разработки пользовательского интерфейса мобильного информационного робота.....	46

## **ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

<b>Десницкий В. А., Котенко И. В.</b> Модель конфигурирования защищенных и энергоэффективных встроенных систем .....	52
<b>Комашинский Д. В., Котенко И. В.</b> Метод извлечения структурных признаков вредоносного программного обеспечения в задаче его обнаружения.....	58
<b>Ануфриева Н. Ю., Мещеряков Р. В., Шевцова Г. А.</b> Оценивание результативности работы центра информационного обслуживания.....	63
<b>Костин А. А., Костина А. А., Латышев Д. М., Молдовян А. А.</b> Программные комплексы серии „Аура“ для защиты информационных систем персональных данных.....	67
<b>SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)</b> .....	73

## THEMATIC ISSUE

# PERSPECTIVE INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

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

## CONTENTS

PREFACE .....	5
<b>INFORMATION TECHNOLOGIES IN CONTROL</b>	
<b>Pavlov A. N.</b> Methodological Basis of Planning Structural and Functional Reconfiguration of Complex Objects .....	7
<b>Maidanovich O. V.</b> Dynamic Interpretation of Complex Object Life Cycle Management ..	13
<b>Kokorin S. V., Potryasaev S. A., Sokolov B. V.</b> Combined Method for Operation Planning and Resource Allocation in Active Mobile Objects Control System .....	17
<b>Ivanov V. O.</b> Optical-Electronic Device for Automatic Landing of the Self-Contained Flying Robot .....	23
<b>Titov V. V.</b> Compliant Motion Control Algorithm for Flexible Joint Manipulator with Partial Dynamic Compensation .....	29
<b>Latukhina E. A.</b> Information System for Electrogastrography Data Storage and Processing .....	34
<b>INFORMATION TECHNOLOGIES IN AUTOMATED SPEECH ANALYSIS</b>	
<b>Karpov A. A., Kipyatkova I. S.</b> Methodology for Estimation of Automatic Speech Recognition System Performance .....	38
<b>Ronzhin A. L., Budkov V. Yu.</b> Analysis of Modern Methods and Systems for Speaker Diarization .....	43
<b>Prishchepa M. V., Baranov K. Yu.</b> Design Features of User Interface of Mobile Informational Robot .....	46
<b>SOFTWARE FOR INFORMATION PROTECTION SYSTEMS</b>	
<b>Desnitsky V. A., Kotenko I. V.</b> Model of Configuring of Secure and Energy-Efficient Embedded Systems .....	52
<b>Komashinckiy D. V., Kotenko I. V.</b> Method of Structural Feature Extraction for Malware Detection .....	58

<b>Anufrieva N. Yu., Meshcheryakov R. V., Shevtsova G. A.</b> Efficiency Estimation of Information Service Center .....	63
<b>Kostin A. A., Kostina A. A., Latyshev D. M., Moldovyan A. A.</b> “Aura” Program Complexes for Personal Data Information System Protection .....	67
<b>SUMMARY</b> .....	73

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

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Анализ современного состояния фундаментальных и прикладных научных работ в области решения проблем управления сложными объектами показывает, что время реакции на происходящие в этой области постоянные изменения, вызванные научно-техническим прогрессом, и адаптации к ним теоретических исследований значительно превышает интервал между очередными изменениями. Все это требует проведения упреждающих исследований, основанных на прогнозировании возможных проблем в рассматриваемой предметной области и разработке соответствующих перспективных методологических и методических основ их решения, базирующихся на принципиально новой парадигме проактивного управления сложными объектами. В отличие от традиционно используемого на практике управления сложными объектами, которое ориентировано на оперативное реагирование на возникающие критические ситуации и последующее их недопущение, проактивное управление предполагает предотвращение критических ситуаций. Для этого на основе концепции системного (комплексного) моделирования предусматривается создание в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий.

В настоящем выпуске журнала, большинство авторов которого являются сотрудниками Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), с различной степенью детализации затрагиваются перечисленные аспекты системного моделирования проактивного управления сложными объектами в динамически изменяющейся обстановке.

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

- информационные технологии в управлении;
- информационные технологии автоматического анализа речи;
- программно-математическое обеспечение систем защиты информации.

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

## PREFACE

Analysis of the current state of basic and applied scientific papers in the domain of complexity management problem shows that the response and adaptation time of theoretical research on the continuous changes in this scientific area aroused by technological progress significantly exceeds the time interval between its sequential changes. All this requires a proactive research based on the prediction of possible problems in the domain, as well as the development of appropriate perspective methodological foundations of problem solutions via new paradigm of proactive control of complex objects. In comparison to traditional reactive control using rapid response and subsequent prevention of incidents, the proactive control implies prevention of incidents by creating innovative predictive and proactive capabilities for control actions formation and implementation of corresponding control system based on the concept of system (complex) modeling.

In this journal issue the authors, most of which are employees of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), consider the above-mentioned aspects of system modeling of complex objects proactive control in a dynamically changing environment addressed with different levels of detail.

Articles presented in the issue are grouped into three thematic areas:

- information technologies in control;
- information technologies in automated speech analysis;
- software for information protection systems.

*Doctor of Technical Science, Professor  
B. V. SOKOLOV,  
Honored Scientist of the Russian Federation,  
Deputy Director for R&D,  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS*

А. Н. ПАВЛОВ

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации объектов в рамках теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем.

*Ключевые слова:* сложный объект, структурно-функциональная реконфигурация, методологические основы.

**Введение.** Исследование современных сложных объектов непосредственно связано со структурной динамикой различной природы, вызванной изменением параметров и состояния объектов на различных этапах их жизненного цикла под действием объективных и субъективных факторов [1, 2]. Особую опасность для функционирования сложных объектов представляют природно-экологические и антропогенно-социальные явления или технико-производственные действия, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф. В этих условиях обеспечение непрерывности технологических процессов, а также повышение катастрофоустойчивости и устойчивости к отказам соответствующих объектов является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов [2—5].

Для успешного функционирования сложных объектов необходимо, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять свою структуру (структуры), состояния, параметры и способы работы в различных условиях. Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения отказоустойчивости и катастрофоустойчивости сложных объектов в рамках теории управления структурной динамикой [4] получил такой вариант управления структурами объектов как реконфигурация.

Под *реконфигурацией* сложного объекта понимается процесс изменения его структуры (структур) в целях сохранения и последующего восстановления (повышения) уровня работоспособности объекта либо в целях обеспечения минимального снижения уровня эффективности системы при деградации ее функций [3, 4].

Основными функциями управления реконфигурацией сложных объектов являются: целеполагание, планирование (стратегическое, долгосрочное, оперативное, календарное и т.п.), регулирование (оперативное управление), контроль и учет, мониторинг и координация. Среди них важнейшей функцией является планирование реконфигурации сложного объекта, исследованию которой и посвящена настоящая статья.

**Постановка задачи.** Предметная область управления реконфигурацией сложных объектов (далее — объекты) характеризуется рядом существенных особенностей, кардинально

отличающих ее от проблематики исследований, рассматриваемой в существующей теории управления сложными системами. К таким особенностям можно отнести, в частности, следующие [1—4]:

— объекты, имеющие повышенную сложность и размерность, обладают свойствами избыточности, многофункциональности, распределенности, унификации, однородности основных функциональных элементов (ФЭ), подсистем и связей;

— объекты характеризуются наличием контуров как отрицательной, так и положительной обратной связи, что приводит к режимам самовозбуждения;

— структурная динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения объектов вызвана тем, что чрезвычайные и катастрофические ситуации, как правило, трудно предсказуемы и возникают внезапно (временная неопределенность в обеспечении готовности к управлению);

— правила и технологии функционирования постоянно изменяются;

— принятие решений осуществляется в условиях жесткого лимита времени, рисков и различных ограничений в возможностях выбора и реализации управляющих воздействий и т.п.

Необходимость учета перечисленных и целого ряда других особенностей процессов управления сложными объектами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки новых, специальных принципов и методов мониторинга, анализа и прогнозирования ситуаций, разработки вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации.

В рамках стандартной (классической) технологии реконфигурации сложных объектов (в ряде случаев называемой „слепой“ реконфигурацией [4]) при отказах и нарушениях функционирования сложного технического объекта в целях сохранения его наиболее приоритетных функций „жертвуют“ другими функциями или частью работоспособных элементов. Следует отметить, что в ходе „слепой“ реконфигурации, как правило, не реализуются такие операции, как учет и анализ текущего состояния объекта и выполняемых им функций; оперативный расчет, оценивание и анализ целевых и информационных возможностей объекта для обоснованного перераспределения его функций между работоспособными элементами и подсистемами.

Таким образом, применительно к современным сложным техническим объектам реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления их структурами для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования объекта. Далее такую реконфигурацию, в отличие от „слепой“, будем называть „структурно-функциональной реконфигурацией“.

Структурно-функциональная реконфигурация сложного объекта, с одной стороны, направлена на изменение топологии системы и характеристик работоспособности ее технической подсистемы для ликвидации последствий различных деструктивных воздействий, а с другой — предполагает гибкое перераспределение выполняемых системой целей, задач и функций между неотказавшими компонентами с учетом допустимости функционирования объекта с ухудшенными в заданных пределах показателями качества. При этом в процессе реконфигурации объект может находиться в одном из состояний  $S = \{S_v, v = 1, 2, \dots, l\}$ . Смена состояний может быть вызвана не только отказами и сбоями отдельных ФЭ, но и аварийными или катастрофическими ситуациями, приводящими к разрушению объекта в целом. Для описания данных ситуаций примем ряд предположений.

**Предположение 1.** Анализ структурной динамики объекта показывает, что, как правило, его структуры не изменяются непрерывно под действием тех или иных причин, а сохраняют постоянство своей топологии на некоторых временных интервалах.



**Предположение 2.** Особенность постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации сложного объекта в первую очередь связана с тем, что совокупность частных показателей  $\mathbf{F}(S_v) = (F_1(S_v), F_2(S_v), \dots, F_h(S_v), \dots, F_H(S_v))$ ,  $h \in \hat{H} = \{1, 2, \dots, H\}$ , качества функционирования объекта в состоянии  $S_v$  может быть *декомпозирована на две группы показателей*. Первая группа показателей отражает *структурно-топологические* (статические) характеристики системы (структурную надежность, структурную устойчивость, структурно-топологические свойства и т.д.) —  $F_h(S_v)$ ,  $h \in \hat{H}_{\text{str}} \subseteq \hat{H}$ ; вторая группа отражает *структурно-функциональные* (динамические) характеристики (функциональную устойчивость, производительность, расходуемые ресурсы, эффективность и др.) —  $F_h(S_v)$ ,  $h \in \hat{H}_{\text{fun}} \subseteq \hat{H}$ , причем  $\hat{H}_{\text{str}} \cup \hat{H}_{\text{fun}} = \hat{H}$ .

**Предположение 3.** Создание планов структурно-функциональной реконфигурации объекта ведется при допущении, что катастрофа, в отличие от отказа (события возможного, прогнозируемого, вероятного), — это событие возможное, но не вероятное, либо его вероятность мала и не может быть обоснованно оценена в процессе проектирования. Иными словами, третье предположение, в рамках рассматриваемой задачи, состоит в том, что причины возникновения кризисных, аварийных и катастрофических ситуаций (в отличие от сбоев и отказов), как правило, не подчиняются вероятностно-статистическим закономерностям и имеют многоаспектную и многофакторную природу, для изучения которой необходимо привлечение технологий системного моделирования.

**Предположение 4.** Функционирование объекта в каждом из состояний  $S_v$  определяется набором отказавших и неотказавших функциональных элементов. *Отказавшим (неработоспособным)* будем считать ФЭ, который не способен выполнить операции сохранения, приема, передачи, обработки и защиты информационных и/или материальных ресурсов; ФЭ будет считаться *частично работоспособным* при возможности выполнения им хотя бы одной из перечисленных операций.

Очевидно, что значения частных показателей  $F_h(S_v)$ ,  $h = 1, 2, \dots, H$ , качества функционирования объекта в каждом из состояний  $S_v$  зависят от множества отказавших, работоспособных и частично работоспособных ФЭ; распределения операций обработки, сохранения, приема—передачи информационных и/или материальных ресурсов; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

**Направления исследований.** Одной из целей управления структурной динамикой сложных объектов является обеспечение в каждый момент времени максимально возможного уровня работоспособности системы и ее элементов. Эта цель достигается с помощью двух дополняющих друг друга процессов: во-первых, целенаправленного воздействия (управления) на процесс деградации объекта таким образом, чтобы исключить или уменьшить возможность (вероятность) переходов объекта в нежелательные состояния, и, во-вторых, управления процессами восстановления работоспособного состояния объекта и компенсации ситуационно появляющихся возмущений [2, 4].

Помимо вышеуказанных особенностей, важным и неотъемлемым условием исследования возможностей объекта является анализ и оценивание его структуры. Одним из возможных подходов к изучению структурных построений сложных объектов является таксономия структур, базирующаяся на таких понятиях, как „однородность—неоднородность“, „равноценность—неравноценность“, „монотонность—немонотонность“. При данном подходе предполагается, что структура объекта однородна, если все включенные в нее функциональные элементы идентичны, и неоднородна, если хотя бы один из ее ФЭ отличается от всех остальных. При оценивании равноценности и неравноценности структурного построения объекта считается, что его

структура равноценна, если потеря одного из ФЭ равнозначна потере любого другого, и наоборот, структура объекта неравноценна, если отдельные ФЭ имеют большую ценность по сравнению с другими. Для изучения этого свойства требуется исследовать критичность входящих в состав объекта функциональных элементов. Выявление критичных элементов способствует оптимизации структур других элементов, играющих в обеспечении надежности, безопасности и живучести объекта наиболее важную (ключевую) роль. Критичность отказов ФЭ рассматривается в широком смысле как комплексное свойство, для оценивания которого целесообразно использовать следующие частные показатели качества: вероятность отказа; степень тяжести последствий отказа; устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов; возможность резервирования; возможность контроля состояния элемента; продолжительность существования риска отказа; возможность локализации отказа.

Проведенный анализ показал, что модели функционирования большинства сложных объектов корректно могут быть представлены структурными схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Однако такие структурные модели могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между функциональными элементами: например, в одних структурных построениях такие связи увеличивают показатель эффективности функционирования системы, а в других — уменьшают. Также монотонными моделями не могут быть представлены системы, где одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или безопасности, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное вредное воздействие на безопасность системы в целом.

На рис. 1 приведены результаты анализа основных аспектов проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. (На рис. 1, как и на рис. 2, сложный объект обозначен аббревиатурой СО.)

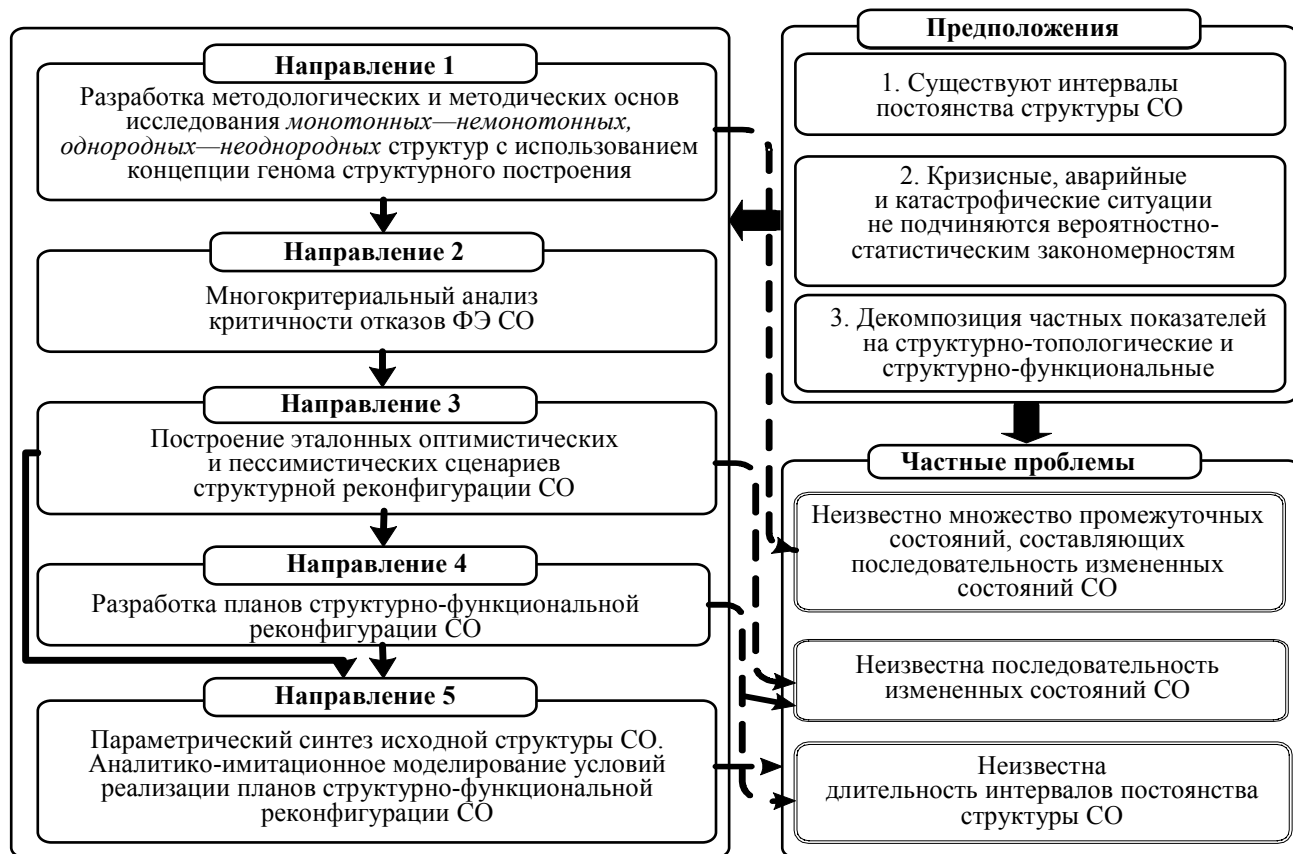


Рис. 1

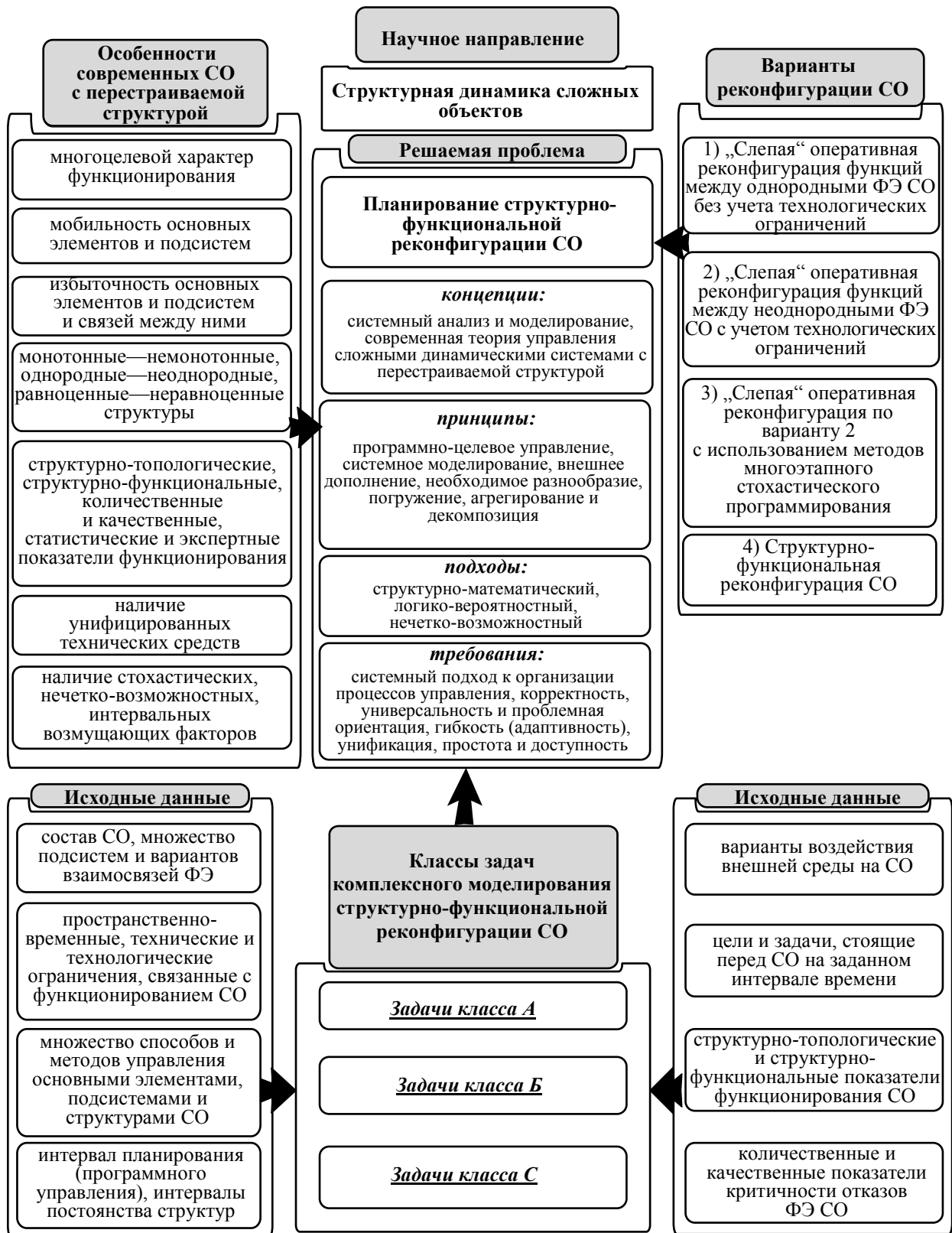


Рис. 2

Резюмируя вышеизложенное и используя результаты проведенного анализа, для решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов можно выделить три основные класса задач (см. рис. 2):

**задачи класса А** — построение эталонных оптимистических и пессимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации объекта при деструктивных воздействиях на критичные функциональные элементы;

**задачи класса В** — построение по указанным эталонным сценариям планов структурно-функциональной реконфигурации объекта, при которых создаются наилучшие условия выполнения целевых задач;

**задачи класса С (вспомогательные):**

— исследование монотонных—немонотонных, однородных—неоднородных, равноценных—неравноценных структур объектов на основе концепции генома структурного построения;

— оценивание показателей критичности отказов ФЭ (структурно-топологических, структурно-функциональных);

— многокритериальный анализ критичности отказов ФЭ;

— построение классов эквивалентных сценариев структурной реконфигурации объектов, выделение эталонных сценариев;

— параметрический синтез начального структурного построения объекта;

— аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации объекта.

На рис. 2 также представлены в обобщенном виде методологические основы решения исследуемой проблемы.

**Заключение.** Анализ современных наиболее перспективных вариантов „слепой“ реконфигурации сложных объектов показал, что процесс формирования их промежуточных состояний с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривался. Существующие постановки задачи „слепой“ реконфигурации характеризуются большой размерностью и не учитывают существенные операции. В целях учета особенностей управления сложными объектами сформулированы и обоснованы общие и частные требования, предъявляемые к разработке новых принципов, моделей, методов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора структурно-функциональной реконфигурации объектов. Анализ данных требований позволил сформулировать основные направления агрегативно-декомпозиционного подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 11-08-01016, 11-08-00767, 12-06-00276, 12-07-00302), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11), а также программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленков В. Г., Будзко В. И., Сеницын И. Н. Катастрофоустойчивость корпоративных информационных систем. М.: ИПИ РАН, 2002. Ч. 1.
2. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учеб. пособие. М.: Изд. центр „Академия“, 2003.
3. Додонов А. Г., Кузнецова М. Г., Горбачик Е. С. Введение в теорию живучести вычислительных систем. Киев: Наукова думка, 1990.
4. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.

5. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5—16.

*Сведения об авторе*

*Александр Николаевич Павлов*

— канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;  
E-mail: pavlov62@list.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

УДК 519.8

О. В. МАЙДАНОВИЧ

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлен анализ современного состояния исследований процессов управления жизненным циклом сложных объектов. Предложена оригинальная динамическая интерпретация указанных процессов, базирующаяся на теории управления структурной динамикой.

**Ключевые слова:** *жизненный цикл сложных объектов, управление структурной динамикой, комплексное моделирование.*

В настоящее время особое внимание отечественных и зарубежных научных школ привлечено к решению таких актуальных проблем, как создание и внедрение новых поколений систем управления жизненным циклом сложных объектов и их основной разновидности — сложных организационно-технических систем (СОТС). При этом на практике (особенно в условиях рыночных отношений) имеют место экономическая неравномерность и неравнозначность различных программ выделения денежных средств на проектирование, разработку, эксплуатацию и совершенствование основных элементов и подсистем СОТС. В этой ситуации каждому конкретному варианту создания и применения СОТС (в том числе, в космической отрасли) соответствуют различные соотношения между эффективностью и стоимостью указанных систем. В этой связи в последнее время значительно возрос интерес к исследованию проблем, связанных с оцениванием и анализом эффективности жизненных циклов СОТС и выбором наиболее предпочтительных вариантов управления их развитием.

Под жизненным циклом сложных организационно-технических систем понимается последовательность фаз их развития от момента формирования облика данных систем до момента снятия их с эксплуатации (перехода на новую систему). Проведем краткий анализ современного состояния исследований в рассматриваемой предметной области.

Возросший интерес к проблемам создания и внедрения систем управления жизненным циклом сложных объектов привел к необходимости проведения значительного количества фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований по данным вопросам. В качестве первого примера такого рода исследований можно привести международный проект PROMISE (Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems), в разработке которого участвовали 22 организации из Евросоюза, Швейцарии, Японии, Австралии и США [1]. В результате выполнения этого проекта, успешно завершено в 2008 г., была предложена более совершенная технология управления жизненным циклом, которая получила название CL<sub>2</sub>M (Closed Loop Lifecycle Management — управление жизненным

циклом ЖЦ с обратной связью). На русском языке в настоящее время, к сожалению, нет публикаций, посвященных изложению сущности этой новой технологии, являющейся естественным развитием PLM-технологии. За рубежом в наиболее концентрированном виде концепция CL<sub>2</sub>M получила свое развитие в проектах PROMISE и DYNAMITE (Dynamic Decisions in Maintenance).

В проекте PROMISE рассматриваются три фазы жизненного цикла COTC:

— начальная (Beginning of Life — BOL) — фаза создания системы, включающая этапы проектирования и производства;

— средняя (Middle of Life — MOL) — применение (использование) системы, ее техническое обслуживание, различные услуги, в том числе ремонт;

— конечная (End of Life — EOL) — эта фаза может характеризоваться различными сценариями: повторным использованием изделия после его модернизации, повторным использованием составных частей или материалов изделия после его разборки, применением новых материалов с улучшенными свойствами, передачей (продажей) для использования по новому назначению или для уничтожения.

Проект PROMISE фокусирует внимание на полном жизненном цикле, но доминантным фактором является необходимость обеспечения обратной связи фаз MOL и EOL с фазой BOL. Это вызвано следующими обстоятельствами: взаимообмен информацией, полученной на этапах проектирования и производства, входящих в состав BOL, осуществляется достаточно эффективно благодаря таким интеллектуальным информационным системам, как CAD/CAM; системы PDM и KM (управления знаниями) также эффективно используются предприятиями промышленности и поставщиками; обмен информацией между фазами BOL, MOL и EOL гораздо слабее. Поступление информации о состоянии большинства технических изделий, особенно высокотехнологичных, выработавших назначенный ресурс, об изделиях бытовой электроники (холодильниках, стиральных машинах и др.), о транспортных средствах и т.д. практически прекращается после поставки изделий потребителю, так как обратная связь от потребителей к разработчикам и производителям отсутствует.

По итогам выполнения проекта PROMISE всем, кто причастен к жизненному циклу COTC, поступает важное концептуальное бизнес-предложение: одновременно с созданием ценностей учитывать процессы преобразования информации, получаемой на всех этапах жизненного цикла, в знания, что позволит улучшить качество товаров и услуг, обеспечить эффективное и устойчивое развитие производства. Основным результатом проекта PROMISE, в конечном счете, заключается в разработке методологии замыкания сформированных на этапах MOL и EOL потоков информации о состоянии изделий на разработчиков и изготовителей. Прерывание потока данных об изделии прежде, чем оно закончит свой жизненный цикл, не позволяло ранее использовать профессиональный опыт и знания специалистов по техническому обслуживанию, ремонту и рециклингу (повторному использованию материалов) при проектировании и производстве.

Реализация проекта PROMISE предполагает широкое использование интеллектуальных информационных сенсоров и приборов, встраиваемых в изделие, а также мобильных информационных технологий (например, радиочастотных меток — RFID tags, приемников GPS, GSM-сигналов), что позволяет осуществлять глобальное и локальное позиционирование изделий, получать, предварительно обрабатывать, хранить и передавать данные о состоянии изделия, а также сведения о необходимом объеме его обслуживания.

В проекте DYNAMITE [2] основные усилия исследователей были направлены на разработку перспективного метода технического обслуживания и ремонта (ТОиР), который базируется на принятии решений о необходимости и объеме обслуживания (ремонта) изделия в реальном времени в процессе его работы. В результате этих исследований были разработаны практические рекомендации по применению новых решений, предложенных в проекте

PROMISE и обеспечивающих более эффективный вклад этапа ТОиР в выполнение таких задач, как создание условий для устойчивого развития промышленности и общества, сохранение ресурсов и снижение нагрузки на окружающую среду, управление безопасностью персонала и разнообразными рисками, повышение безотказности, готовности и конкурентоспособности оборудования. Перспективы процесса ТОиР связываются с широким применением электронного обслуживания (e-maintenance), реализация которого позволит ответить на следующие вопросы: какое оборудование и когда нуждается в обслуживании или/и ремонте, кто его должен выполнить, имеются ли в наличии и готовы ли для выполнения работ запасные части системы и необходимые руководства. В этом случае на встроенные в будущие изделия интеллектуальные информационные сенсоры и приборы (например, построенные на других физических принципах) можно будет наряду с функциями позиционирования, контроля и диагностики возложить также функции автоматического составления отчетов о состоянии соответствующей подсистемы контролируемого оборудования, в том числе предоставления данных о всех возникающих неисправностях, об остатке ресурса изнашиваемых деталей, о ресурсе расходных материалов, о загрузке оборудования и режиме его эксплуатации. Ключевыми элементами предлагаемого электронного обслуживания будут технологии, базирующиеся на Web-сервисах дистанционного администрирования, мониторинга, тестирования, диагностики и прогнозирования состояния эксплуатируемых изделий, а также технологии реконфигурации их структур в случае возникновения аварийных и нештатных ситуаций и отсутствия необходимых резервов.

Однако для реализации перечисленных возможностей современных информационных технологий и систем при решении проблем анализа и синтеза систем управления жизненным циклом сложных объектов необходимо разработать соответствующие методологические и методические основы. Кратко остановимся на одном из перспективных подходов к конструктивному решению данных проблем — структурно-динамической интерпретации указанных процессов.

Руководствуясь основополагающими концепциями и принципами системного подхода, целесообразно проблему управления жизненным циклом СОТС рассматривать не изолированно, а в рамках более общей проблемы управления структурной динамикой системы на различных этапах ее жизненного цикла [3—6]. Данная динамическая интерпретация позволяет, *во-первых*, непосредственно связать общие цели, на достижение которых ориентировано функционирование СОТС, с целями, которые реализуются в ходе управления ее структурами, *во-вторых*, обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций (действий), связанных со структурной динамикой (другими словами, синтезировать технологию управления СОТС), и, *в-третьих*, осознанно найти компромиссные решения при распределении ограниченных ресурсов, выделяемых на управление структурной динамикой.

Говоря о задачах управления структурной динамикой СОТС на различных этапах ее жизненного цикла, следует, прежде всего, исходить из так называемого *структурно-функционального подхода* (СФП) к описанию объектов любой природы [3—5]. Структурно-функциональный подход, в общем случае, представляет собой совокупность философских концепций и объективных закономерностей развития систем, научных положений и выводов, определяющих стратегию и методы анализа и синтеза антропогенных систем, к которым, в частности, относится СОТС [3, 5]. Характерными особенностями СФП являются [3]: учет диалектической взаимосвязи функций и структуры объекта при определяющей роли функции по отношению к структуре; целостный подход к анализу и синтезу многоуровневых систем; учет вещественно-энергетических и информационных связей между элементами системы; учет взаимосвязи исследуемой (создаваемой) системы с внешней средой.

Взаимоотношения функций и структур СОТС в процессе ее развития характеризуются не только единством, но и противоречиями между ними. При этом разрешение указанных противоречий может осуществляться различными альтернативными путями — от полного отказа от прежней структуры (структур), переставшей соответствовать новому содержанию (новым функциям), до использования прежней структуры (структур) несмотря на существенно изменившиеся функции. Управление структурной динамикой СОТС в этом случае направлено на формирование оптимальной последовательности действий, которая должна обеспечить наилучшее разрешение (с точки зрения лица, принимающего решение) диалектического противоречия между функциями и соответствующими структурами на каждом из этапов жизненного цикла СОТС. При этом на ранних этапах жизненного цикла должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесен такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения системы по целевому назначению будет обеспечена возможность гибко реагировать на все расчетные и нерасчетные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию ее структур.

Применительно к процессам управления жизненным циклом СОТС целесообразно исходить из того, что, во-первых, данные процессы имеют многоэтапный и многоуровневый характер, и, во-вторых, сама управленческая деятельность предполагает реализацию взаимосвязанной последовательности актов принятия решений, осуществляемых как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме (в последнем случае, например, с участием лиц, принимающих решения, и лиц, обосновывающих рассматриваемые решения [5, 6]).

Предлагаемая динамическая интерпретация процессов управления жизненным циклом СОТС позволяет, как показывает предварительный анализ, воспользоваться многоэтапной процедурой структурно-функционального синтеза облика сложных объектов, включающей в общем случае две основные фазы — во-первых, формирование многоструктурных макросостояний, соответствующих требуемому целевому назначению объекта, и, во-вторых, синтез и реализацию программ перехода из заданного (исходного) многоструктурного макросостояния в требуемое (сформированное на первой фазе) макросостояние [5, 6].

Итак, рассматривая процессы управления жизненным циклом СОТС во взаимосвязи с процессами управления структурной динамикой данных систем, для конструктивного решения задач комплексной автоматизации и интеллектуализации указанных процессов можно привлечь методологические и методические основы современной теории задач управления обобщенными динамическими системами с перестраиваемой структурой [5].

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных при финансовой поддержке Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проекты № 2.11, 2.12).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Life-Cycle Management: State of the art theory and practice // Intern. J. of Life Cycle Assessment. 2002. Vol. 7. N 6.
2. Stark J. Product Lifecycle Management: Paradigm for 21st Century Product Realisation. Springer, 2004.
3. Балашов Е. П. Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
4. Кульга К. С. Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы. М.: Машиностроение, 2008. 256 с.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
6. Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Куссиль Н. Н., Соколов Б. В., Цивирко Е. Г., Юсупов Р. М. Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффективности информационных технологий и систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 7 — 16.



*Сведения об авторе**Олег Владимирович Майданович*

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра компьютерной математики и программирования; E-mail: sid.sn@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

УДК 519.8

С. В. КОКОРИН, С. А. ПОТРЯСАЕВ, Б. В. СОКОЛОВ

**КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД  
ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Предложены обобщенная динамическая модель и комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами, позволяющие учесть основные ограничения системы управления на основе реализации концепции комплексного моделирования.

*Ключевые слова:* комплексное планирование, система управления активными подвижными объектами, комбинированные методы моделирования и оптимизации.

**Введение.** Анализ основных направлений развития современных сложных организационно-технических систем (СОТС) позволил выделить ряд их особенностей, к числу которых относятся: многоаспектность и неопределенность поведения; иерархичность; подобие структур и избыточность основных элементов и подсистем и их взаимосвязей; разнообразие функций управления на каждом уровне системы; территориальная распределенность компонентов системы. Предварительные исследования показывают, что в качестве базового элемента при формальном описании процесса управления СОТС может использоваться активный подвижный объект (АПО) [1]. В общем случае это искусственный объект (аппаратно-программный комплекс), перемещающийся в пространстве и взаимодействующий с другими АПО и внешними объектами обслуживания, в ходе которого формируются информационные, энергетические и материальные потоки [2, 3]. На практике, как правило, из-за достаточно низкого уровня автономности АПО создаются распределенные системы управления АПО (СУ АПО). В этом случае на концептуальном уровне процесс функционирования СУ АПО может быть представлен как процесс выполнения соответствующих целевых и технологических (обеспечивающих) операций и распределения ресурсов в рассматриваемой системе управления.

На содержательном уровне задача комплексного планирования функционирования СУ АПО может быть сформулирована следующим образом: необходимо выбрать такой допустимый план выполнения операций и распределения ресурсов системы, в ходе реализации которого, в рамках заданных сценариев воздействия возмущающих факторов, будут выполнены своевременно и полностью все операции, составляющие соответствующие технологические циклы управления, а уровень сервиса (качества) планирования будет удовлетворять заданным требованиям. При этом если будет получено несколько планов, то необходимо выбрать наилучший план относительно принятых критериев и показателей оптимальности.

**Формальная постановка задачи.** На основе ранее разработанных частных динамических моделей планирования СУ АПО [1—3] запишем обобщенную динамическую модель процессов функционирования указанной системы в условиях возмущающих воздействий:

$$J_G(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\xi}(t), t) \rightarrow \underset{\mathbf{u}(t) \in \Delta}{\text{extr}}; \quad (1)$$

$$\Delta = \begin{cases} \mathbf{u}(t) | \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\varphi}(t_0, \mathbf{x}(t_0), \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\xi}(t), t); \\ \mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\xi}(t), t); \\ \mathbf{x}(t_0) \in X_0(\boldsymbol{\beta}), \quad \mathbf{x}(t_f) \in X_f(\boldsymbol{\beta}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}(t)$  — обобщенный вектор состояния СУ АПО;  $\mathbf{y}(t)$  — обобщенный вектор выходных характеристик (показатели качества функционирования СУ АПО);  $\mathbf{u}(t)$  — вектор программного управления, представляющий план функционирования СУ АПО;  $\boldsymbol{\beta}$  — обобщенный вектор параметров СУ АПО, характеризующих основные технические и технологические возможности аппаратно-программных средств, входящих в ее состав;  $\boldsymbol{\varphi}$ ,  $\boldsymbol{\eta}$  — соответственно многомерные переходная и выходная функции, задаваемые в общем случае в аналитико-алгоритмическом (имитационном) виде;  $X_0(\boldsymbol{\beta})$ ,  $X_f(\boldsymbol{\beta})$  — значение вектора  $\mathbf{x}(t)$  в начальный и конечный моменты времени;  $t \in [t_0, t_f]$  — заданный интервал планирования работы СУ АПО;  $\boldsymbol{\xi}(t)$  — вектор возмущающих воздействий, имеющих как объективный, так и субъективный характер и задаваемых извне в виде соответствующих сценариев  $\boldsymbol{\xi}(t) \in \Xi$ .

Для определенности в дальнейшем будем предполагать, что указанные возмущающие воздействия задаются в виде импульсных стохастических случайных процессов [4].

В состав рассматриваемой динамической модели планирования включим вектор показателей качества планирования

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\xi}(t), t) = \left\| \mathbf{J}^{(o)T}, \mathbf{J}^{(k)T}, \mathbf{J}^{(p)T} \right\|^T, \quad (3)$$

где  $\mathbf{J}^{(o)T}$ ,  $\mathbf{J}^{(k)T}$ ,  $\mathbf{J}^{(p)T}$  — соответствующие векторы показателей качества планирования операций, распределения ресурсов и потоков при различных сценариях реализации возмущающих воздействий.

Примеры конкретного описания данных показателей качества для детерминированного и стохастического вариантов задания исходных данных приведены в работах [1, 2].

**Комбинированный метод решения задачи.** Предположим, что в задаче векторной оптимизации при решении исходной задачи планирования (см. формулы (1), (2)) будет использоваться простейшая линейная свертка вида

$$J_G = \sum_{\alpha=1}^h C_\alpha J_\alpha, \quad C_\alpha \geq 0, \quad \sum_{\alpha=1}^h C_\alpha = 1. \quad (4)$$

Более сложные варианты построения указанных сверток для рассматриваемого класса задач планирования подробно изложены в работах [1, 5].

Динамическая задача комплексного планирования операций и распределения ресурсов СУ АПО в условиях стохастических возмущающих воздействий (см. формулы (1)—(3)) может рассматриваться как многоэтапная задача стохастического программирования. В данной статье предполагается, что распределение ресурсов СУ АПО в условиях возмущающих воздействий можно конструктивно описать с использованием дискретно-событийных стохастических моделей, исследуемых в современной теории сетей массового обслуживания [6]. При этом в соответствии со структурными особенностями СУ АПО задачу стохастического про-

граммирования можно декомпозировать на две взаимосвязанные задачи оптимизации процесса функционирования рассматриваемой системы [5, 7]:

— подзадачу оптимизации функционала (1) на основе варьирования вектора  $\zeta$  приоритетов операций обслуживания АПО при фиксированном векторе  $\mathbf{p}$  параметров, характеризующих технические и технологические возможности системы (подвекторе  $\beta$ : см. формулы (1)—(2));

— подзадачу оптимизации функционала (1) на основе варьирования вектора  $\mathbf{p}$  при фиксированном векторе  $\zeta$ .

Для реализации данного подхода предлагается следующая двухэтапная итерационная процедура.

Этап 1. Оптимизация процесса выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО с использованием ее аналитико-имитационной (стохастической) модели:

$$f\left(q_0\left(\zeta^{(v)}, \mathbf{p}_v\right)\right) \rightarrow \min_{\mathbf{p}_v \in \Omega}, \quad (5)$$

где  $q_0(\cdot)$  — аналитико-имитационное описание взаимосвязи оптимизируемых параметров модели планирования;  $\Omega$  — множество допустимых значений параметров, характеризующих СУ АПО;  $v$  — номер итерации.

Этап 2. Динамическое планирование операций и распределение ресурсов с фиксированным вектором параметров  $\mathbf{p}_v$ , полученным на предыдущем этапе:

$$f\left(q_0\left(\zeta^{(v+1)}, \mathbf{p}_v\right)\right) \rightarrow \min_{\zeta^{(v+1)} \in Z}, \quad (6)$$

где  $Z$  — множество допустимых значений приоритетов.

Для реализации рассматриваемой процедуры на нулевой итерации ( $v = 0$ ) необходимо задать вектор начальных значений приоритетов ( $\zeta^{(v)} = \zeta^{(0)}$ ) операций, выполняемых в СУ АПО. Его можно сформировать, например, алгоритмически (неявно), используя такие эвристические правила диспетчеризации, как FIFO, LIFO. Итерационный процесс поиска оптимального плана заканчивается в одном из следующих случаев: при достижении заданного уровня разности значений функционалов на двух последовательных итерациях:

$$\left|f\left(q_0\left(\zeta^{(v+1)}, \mathbf{p}_{v+1}\right)\right) - f\left(q_0\left(\zeta^{(v)}, \mathbf{p}_v\right)\right)\right| < \tilde{\epsilon}, \quad (7)$$

где  $\tilde{\epsilon}$  — известная величина; либо, если стабильная сходимость не наблюдается, используется эвристическое правило выхода из итерационной процедуры. При этом проверку условия (7) можно проводить, только начиная с первой итерации, так как вектор  $\mathbf{p}_0$  в начале итерационной процедуры не определен.

**Комбинированный метод оптимизации параметров СУ АПО.** Рассмотрим более подробно содержание первого этапа предложенной итерационной процедуры. Для оптимизации вектора параметров  $\mathbf{p}$  целесообразно использовать комбинацию метода глобального поиска (метод  $\Psi$ -преобразования [8]) и метода численной оптимизации без расчета производных (метод главных осей Брента [9]). Метод  $\Psi$ -преобразования — метод поиска глобального экстремума целевой функции (5) — не требует задания начального приближения при решении исходной задачи оптимизации, но характеризуется существенными вычислительными затратами при увеличении размерности вектора оптимизируемых параметров  $\mathbf{p}_v$ . Использование только метода  $\Psi$ -преобразования при оптимизации функционала (5) приводит к

большим погрешностям. Поэтому предлагается его дополнить методом локальной оптимизации функционала (5). Применительно к рассматриваемой задаче планирования работоспособность данного метода была продемонстрирована при оптимизации систем с сетевой структурой [6].

Главный недостаток метода локальной оптимизации, точнее, его алгоритмической реализации, заключается в необходимости задания начального приближения, которое должно быть рассчитано для каждой задачи отдельно. Однако первое приближение уже известно (в результате оптимизации функционала (5) с использованием метода  $\Psi$ -преобразования). Метод характеризуется двумя основными параметрами: показателем точности расчета целевой функции, который определяет момент остановки итерационного цикла, и шагом изменения оптимизируемых параметров, определяющим скорость сходимости алгоритма. Теоретическая сходимость данного метода для случая дважды непрерывно дифференцируемых функций была доказана в работе [9]. Применительно к исследуемой задаче планирования вычислительные эксперименты показали хорошую сходимость для более широкого класса оптимизируемых целевых функций, которые не являются в общем случае дифференцируемыми ((2), (3)).

#### Метод динамического планирования операций и распределения ресурсов СУ АПО.

Данный метод предлагается использовать для формирования собственно плана выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО. В работах [2, 3, 5] показано, что каждому такому плану может быть поставлен в соответствие комбинированный вектор сопряженной системы уравнений, который в данной задаче может интерпретироваться уже как вектор динамических приоритетов  $\zeta_0$ . Более того, в указанных работах также данный вектор рассматривается как вектор координирующих воздействий при реализации процедуры интерактивного планирования СУ АПО, оценивании устойчивости планов, а также при выработке корректирующих воздействий, позволяющих адаптировать как детерминированную динамическую модель планирования, так и аналитико-имитационную модель процесса реализации составленных планов с учетом возможных возмущающих воздействий.

Кратко остановимся на общей итеративной схеме формирования вектора динамических приоритетов, основанной на методе локальных сечений и представляющей собой одну из модификаций принципа максимума Понтрягина для случая задания смешанных ограничений [2, 5]. Рассмотрим алгоритм, реализующий данную схему.

*Шаг 1.* Задание диспетчерского решения (допустимого плана)  $\mathbf{u}_d(t), t \in (t_0, t_f]$ ; в частном случае в качестве допустимого может быть выбран „нулевой“ план —  $\mathbf{u}_d(t) \equiv \mathbf{0}$ .

*Шаг 2.* Интегрирование системы уравнений (2), описывающей процесс функционирования СУ АПО, с заданными начальными условиями, характеризующими ее текущее состояние, и  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_d(t)$ . В работах [2, 5] был описан один из вариантов представления системы уравнений (2) в виде детерминированной нестационарной конечномерной дифференциальной динамической системы  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ . В результате интегрирования получаем вектор-функцию  $\mathbf{x}_d(t)$ . Также в конечный момент времени рассчитываются значение обобщенного показателя качества планирования  $J_G$  и значение вектора сопряженной системы уравнений с использованием условия трансверсальности.

*Шаг 3.* Интегрирование в обратном времени от  $t = t_f$  до  $t = t_0$  при  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_d(t)$  сопряженной системы уравнений вида

$$\dot{\psi}_l = -\frac{\partial H}{\partial x_l} + \sum_{\delta=1}^{I_1} \lambda_{\delta}(t) \frac{\partial g_{\delta}^{(1)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))}{\partial x_l} + \sum_{\tilde{\gamma}=1}^{I_3} \rho_{\tilde{\gamma}}(t) \frac{\partial g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))}{\partial x_l}, l = 1, \dots, \tilde{n}, \quad (8)$$

где  $H = \Psi^T(t) \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$  — гамильтониан,  $\lambda_\delta(t)$  и  $\rho_{\tilde{\gamma}}(t)$  — динамические множители Лагранжа;

$$\text{grad}_{\mathbf{u}} H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \Psi(t)) = \sum_{\delta=1}^{I_1} \lambda_\delta(t) \text{grad}_{\mathbf{u}} g_\delta^{(1)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \sum_{\tilde{\gamma}=1}^{I_2} \rho_{\tilde{\gamma}}(t) \text{grad}_{\mathbf{u}} g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (9)$$

где  $\Psi(t)$  — вектор сопряженной системы уравнений;  $I_1$  — множество индексов для ограничений типа равенства  $g_\delta^{(1)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = 0$ ,  $\delta \in I_1$ ;  $I_2$  — множество индексов для ограничений типа неравенства  $g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0$ ,  $\tilde{\gamma} \in I_2$ ;  $I_3$  — множество активных индексов, для которых ограничения типа  $g_{\tilde{\gamma}}^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0$  превращаются в равенства.

В момент времени  $t = t_0$  (момент окончания интегрирования системы (8)) формируется первое приближение значений сопряженной системы уравнений  $\Psi_i(t_0)$ . На этом завершается итерация  $r = 0$ .

Далее — повторение шагов 2 и 3 до тех пор, пока не будут выполнены условия  $|J_G^{(r+1)} - J_G^{(r)}| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная точность численного решения рассматриваемой двухточечной краевой задачи.

В результате решения рассматриваемой задачи планирования работы СУ АПО, интерпретируемой как задача оптимального программного управления соответствующей динамической системой вида (2), формируется вектор динамических приоритетов  $\zeta(t) = \zeta(\Psi(t_0))$ , который функционально (через функцию Гамильтона) связан с вектором сопряженной системы уравнений (8) и однозначно определяет оптимальный план выполнения операций и распределения ресурсов в СУ АПО.

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработана оригинальная многоэтапная процедура комплексного планирования функционирования системы управления активными подвижными объектами с учетом факторов неопределенности. Главное преимущество предложенного подхода по сравнению с существующими заключается в комбинированном динамическом (контекстном) учете при планировании функционирования СУ АПО как различных типов ограничений, накладываемых на указанный процесс, так и возможных классов возмущающих воздействий, влияющих на устойчивость построенных планов, который осуществляется на основе одновременного использования при формировании планов детерминированных и стохастических моделей.

Другое преимущество предложенного комбинированного подхода заключается в том, что как при итеративном поиске параметров СУ АПО с использованием стохастических моделей и методов глобальной оптимизации, так и при формировании собственно плана функционирования системы обеспечивается монотонная сходимость итеративных процессов за счет интерактивной гибкой настройки программного обеспечения, реализующего разработанные методы на компьютере, на основе использования заранее введенной параметрической и структурной избыточности в соответствующие численные алгоритмы оптимизации.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311-а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11, 2.12), а также программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI/184/2011/14.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В. Н. Теоретические основы управления активными подвижными объектами. МО СССР, 1974. 130 с.
2. Соколов Б. В., Калинин В. Н. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
3. Соколов Б. В., Калинин В. Н. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1985. № 5. С. 106—114.
4. Килин Ф. М. Теория и принципы построения автоматизированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
6. Кокорин С. В., Рыжиков Ю. И. Оптимизация параметров сетей массового обслуживания на основе комбинированного использования аналитических и имитационных моделей // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 61—66.
7. Краснощёков П. С., Морозов В. В., Федоров В. В. Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1979. № 2. С. 7—18.
8. Чичинадзе В. К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. Метод пси-преобразования. М.: Наука, 1983.
9. Brent R. P. Algorithms for Minimization without Derivatives. NJ, USA: Prentice-Hall Inc., 1973. 195 p.

**Сведения об авторах**

- Сергей Владимирович Кокорин** — СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. науч. сотрудник;  
E-mail: kokorins@list.ru
- Семен Алексеевич Потрясаев** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;  
E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научной работе; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

В. О. ИВАНОВ

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ АВТОНОМНОГО ЛЕТАЮЩЕГО РОБОТА

Представлен один из вариантов оптико-электронного устройства навигации для автоматической посадки малогабаритного автономного летающего робота. Приведены общая схема и принципы построения устройства; рассмотрены основные виды его погрешностей и результаты исследований макета.

**Ключевые слова:** оптико-электронное устройство, автоматическая посадка, система автоматического управления, автономный летающий робот.

**Введение.** Беспилотные летательные аппараты (ЛА), входящие в состав авиационных комплексов, являются на сегодняшний день перспективными, динамично развивающимися и широко применяемыми системами. Использование малогабаритных беспилотных средств обеспечивает максимальную оперативность исследований (мониторинга местности, аэрофотосъемки и т.д.) при относительно низкой стоимости эксплуатации. Значительный интерес представляют малогабаритные автономные летающие роботы (АЛР), относящиеся к классу беспилотных ЛА со взлетной массой до 5 кг [1]. Следствием массогабаритных ограничений АЛР является проблема создания бортовой авионики, обеспечивающей автономное управление ЛА на всех этапах полета. При этом вопросы управления автоматической посадкой малогабаритных АЛР вызывают особый интерес.

Посадка — крайне сложный и ответственный этап полета для всех типов летательных аппаратов. Снижение самолета перед заходом на посадку, выполнение предпосадочного маневра (глиссады), приземление и пробег по взлетно-посадочной полосе составляют совокупность этапов полета, на которые приходится значительный процент общего числа аварий и катастроф [2].

Одной из наиболее технически сложных проблем обеспечения безопасности посадки является ее автоматизация. Очевидно, что реализовать режим автоматической посадки возможно только в случае, когда система автоматической посадки удовлетворяет требуемому уровню надежности и безопасности. Таким образом, особое значение при разработке данных систем имеет качество управления летательным аппаратом и его навигация [3—5].

Эта проблематика является предметом множества исследований фундаментального и прикладного характера [6—9]. Разработка бортовых систем управления автоматической посадкой ЛА предполагает комплексное использование различных навигационных технологий. Известны традиционные радиотехнические и лазерные [7, 8] средства автоматической навигации, с помощью которых во время посадки можно определять навигационные параметры: координаты, скорость и ориентацию самолета. Из-за массогабаритных ограничений АЛР использование указанных технических средств зачастую невозможно. Применение спутниковой и инерциальной [9] систем навигации во время автоматической посадки АЛР перспективно, но не позволяет достаточно точно определить навигационные параметры и эффективно только на этапах выхода на глиссаду посадки.

**Построение оптико-электронного устройства навигации.** Одним из возможных путей решения задачи автоматической посадки малогабаритных АЛР является устройство навигации оптико-электронного типа, предназначенное для пилотирования по визуальным ориентирам на местности с помощью телевизионных каналов и современных методов и алгоритмов цифровой обработки изображений [10].

Использование возможностей систем технического зрения для управления подвижными объектами различных типов и назначения, включая манипуляционные и мобильные роботы, является далеко не новой, но актуальной проблемой. Для ее решения необходимо разрабатывать современные методы и алгоритмы предварительной обработки видеоизображений, распознавания и классификации образов. В ряде случаев учет специфики конкретных прикладных задач обработки и анализа изображений в режиме реального времени в совокупности с использованием различных эвристических приемов позволяет добиться искомого результата методами, пригодными для реализации в малогабаритных АЛР.

Преимущество использования для автоматической навигации АЛР оптико-электронного устройства (ОЭУ) обусловлено возможностью применения бортовой штатной оптико-телевизионной (оптико-электронной) аппаратуры и бортового компьютера, что позволит существенно уменьшить массу и габариты необходимого дополнительного оборудования. С другой стороны, применение аппаратно-программных средств ОЭУ в комплексе с другими средствами навигации позволит значительно повысить надежность и безопасность автоматической посадки АЛР.

Структурная схема оптико-электронного устройства для автоматической посадки АЛР представлена на рис. 1.

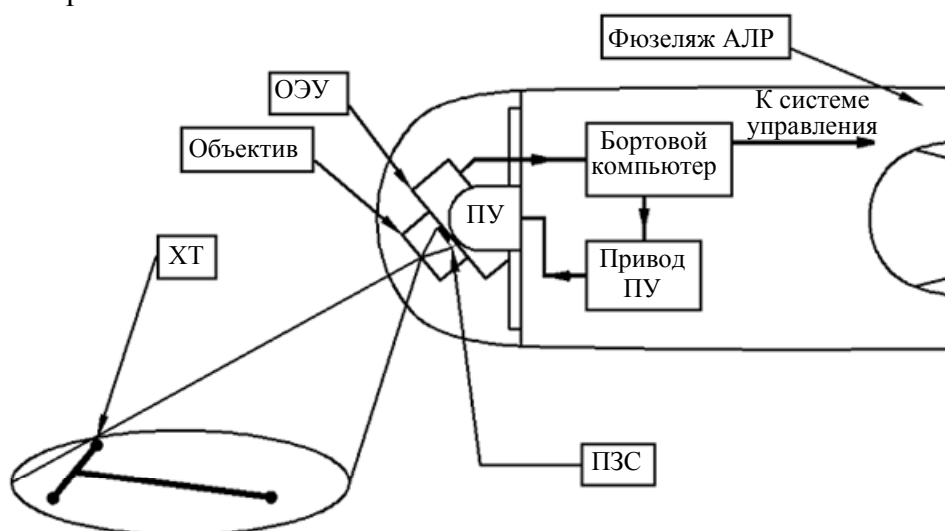


Рис. 1

Отраженное от земной поверхности оптическое излучение попадает в поле зрения объектива и проецируется на фоточувствительную ПЗС-матрицу, где оптическое изображение преобразуется в матрицу электрических зарядов. ПЗС считывает электрические заряды, преобразуя их в цифровой сигнал, поступающий на блок первичной обработки изображения — видеопроцессор бортового компьютера, где с помощью специальных алгоритмов производится фильтрация полезного сигнала и вычисляются координаты ориентиров (или специальных реперов) — характерных точек (ХТ) объекта на земной поверхности.

В вычислительном устройстве бортового компьютера по координатам характерных точек, положению поворотного устройства (ПУ) и его привода, а также по данным с других датчиков (приемника GPS, датчика скорости, дальномера, акселерометра и др.) рассчитываются параметры пространственного положения АЛР.

Среди множества методик расчета расстояния ( $D$ ) от ОЭУ, вдоль его оптической оси, до характерных точек на местности выделим две [11, 12]:

- с использованием одной телекамеры, установленной на борту АЛР, и нескольких ориентиров, расстояния между которыми известны;
- с использованием двух телекамер, установленных на борту АЛР, расстояние между которыми известно с высокой точностью.



После вычисления в бортовом компьютере данные об углах ориентации АЛР и расстояниях до характерных точек объектов поступают на вход типовой (стандартной) системы управления (СУ) исполнительными механизмами АЛР.

Предложенный способ автоматической навигации, в том числе посадки АЛР, позволяет сформировать обобщенную структурную схему бортовой системы автоматического управления (САУ) роботом (рис. 2), в состав которой входят следующие элементы: бортовой компьютер (видеопроцессор, вычислительное устройство, микропроцессор), ОЭУ, привод ПУ, СУ, исполнительные механизмы (ИМ) и канал связи (КС).

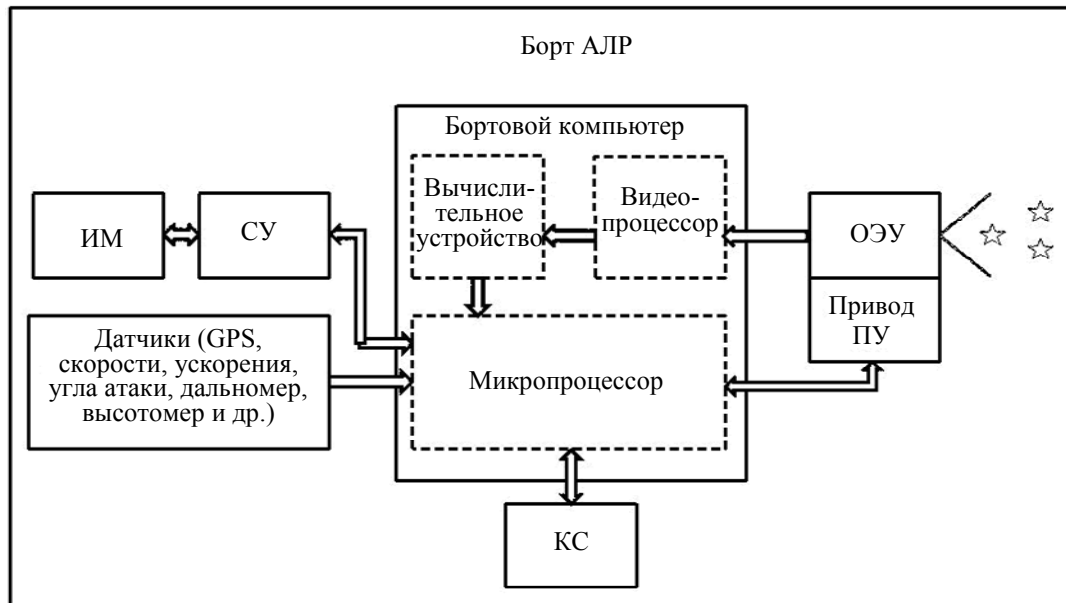


Рис. 2

**Оценка погрешностей измерительной системы ОЭУ.** Условно погрешности измерительной системы ОЭУ можно разделить на „внутренние“ и „внешние“ [13]. Основные виды „внутренних“ погрешностей представлены в таблице.

„Внутренние“ погрешности ОЭУ		
конструкционные	методологические	температурные
Конструкция корпуса устройства Место размещения устройства в фюзеляже АЛР Способы крепления ОЭУ на ПУ Погрешность калибровочной системы Погрешность юстировки Точность изготовления ПЗС-матрицы Ошибки привода ПУ	Погрешность метода вычислений Фильтрация шумов по нескольким измерениям Неточность формирования трехмерной модели АЛР Погрешности аналого-цифрового преобразователя	Флюктуационные шумы Температурный дрейф конструкции устройства

Под „внешними“ погрешностями понимаются следующие воздействия:

- дифракция неоднородности среды (атмосферы);
- оптические засветки устройства;
- оптическая неоднородность фона, рельефа и окружающей среды (дым, пыль);
- изменения освещенности в районе посадки;
- метеорологические условия: туман, облачность, осадки.

Основная „внутренняя“ погрешность измерений ( $\epsilon$ ), по результатам предварительных исследований, включает в себя следующие компоненты:

- случайная (шумовая) погрешность ( $\epsilon_{СКО}$ );
- погрешность калибровки оптической системы ( $\epsilon_k$ );
- погрешность температурного дрейфа конструкции ( $\epsilon_T$ );

— погрешность юстировки (привязки) ( $\varepsilon_{\text{пр}}$ ).

Основная погрешность ОЭУ при однократном измерении координат характерной точки определяется как

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_{\text{СКО}}^2 + \varepsilon_{\text{к}}^2 + \varepsilon_{\text{т}}^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2;$$

расчет погрешности  $\varepsilon_{\text{СКО}}$  выполняется с учетом случайной угловой погрешности при измерении координат одной характерной точки:

$$\varepsilon_{\text{СКО}} = 2\omega\varepsilon,$$

где  $2\omega$  — угловое поле зрения объектива ОУЭ.

Приведем пример расчета случайных погрешностей определения линейных отклонений АЛР по курсу ( $\varepsilon_x$ ) и дальности ( $\varepsilon_d$ ) при вертикальном расположении оптической оси устройства (рис. 3). Исходные данные при расчете: поле зрения объектива ОЭУ ( $2\omega$ )  $30^\circ$ , угол  $\psi = 6^\circ$ , расстояние  $D = 150$  м.

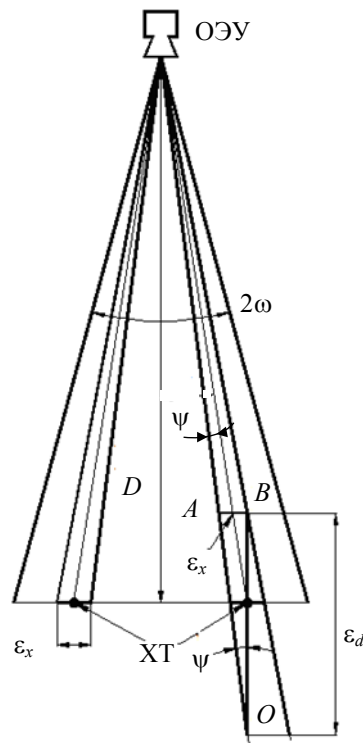


Рис. 3

Определим численные значения погрешностей для заданных условий.

Погрешность  $\varepsilon_x$  определяется соотношением

$$\varepsilon_x = \frac{2\omega}{Z} D,$$

где  $Z = 40\,000$  — количество отсчетов в ПЗС-матрице (согласно паспортным данным); для заданных условий  $\varepsilon_x \approx 2$  мм.

Погрешность  $\varepsilon_d$  определяется параметрами треугольника  $AOB$  (см. рис. 3). В треугольнике, в силу малости угла  $\psi$ , отрезок  $AB \approx \varepsilon_x$ , а  $\angle AOB \approx \psi$ . Тогда выражение для линейной погрешности по дальности имеет вид

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_x}{\text{tg}\psi}.$$

Для заданных условий  $\varepsilon_d \approx 20$  мм.

Таким образом, линейная погрешность по дальности превышает линейную погрешность по курсу примерно в 10 раз.

С учетом накопления двух и более измерений (отсчетов) линейные погрешности по курсу и дальности рассчитываются по следующим формулам:

$$\varepsilon_x = (\sqrt{n})^{-1} \cdot \frac{2\omega}{Z} D; \quad \varepsilon_d = (\sqrt{n})^{-1} \cdot \frac{\varepsilon_x}{\operatorname{tg}\psi},$$

где  $n$  — количество измерений.

**Результаты стендовых исследований.** Предложенная схема построения оптико-электронного устройства для автоматической посадки АЛР и методика расчета расстояния до характерных точек на местности были опробованы на макете поворотной телекамеры в стендовых условиях.

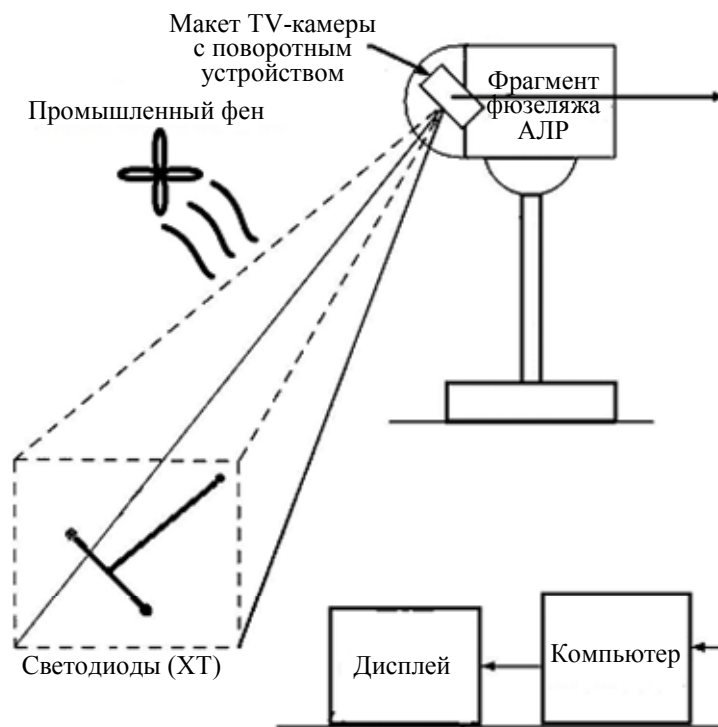


Рис. 4

Стендовое оборудование для проведения экспериментальных исследований (структурная схема приведена на рис. 4) содержит фрагмент фюзеляжа АЛР, телекамеру с поворотным двухосевым устройством, систему светодиодов с различной длиной волны (синий, красный, зеленый), компьютер с дисплеем, источник тепла и турбулентности (промышленный фен) между камерой и светодиодами.

В результате исследований подтверждена возможность использования предложенной методики расчета дальности до характерных точек объекта и вычислены координаты положения макета фюзеляжа АЛР ( $X, Y, Z$ ) и углы ориентации (курс, крен, тангаж).

Результаты стендовых исследований показали также, что основной вклад в погрешность измерений, связанную с влиянием внешних возмущающих факторов, вносит дифракция оптического излучения светодиодов, вызванная температурными градиентами воздушной среды: дополнительная погрешность может составлять до 50 мкм при дальности до 10 м и температурных градиентах 50 °С. Следует отметить, что дифракция оптического излучения светодиодов зависит от длины волны (при одном и том же значении градиента температуры). Погрешности измерений для красного, зеленого и синего светодиодов отличаются на 20—50 %.

**Заключение.** Полученные результаты исследований подтвердили принципиальную возможность использования оптико-электронного устройства (бортовых ТВ-камер) в качестве

датчиков навигации и ориентации малогабаритных автономных летающих роботов, а также возможность разработки на основе ОЭУ математических моделей и методов построения системы автоматического управления полетом и посадкой АЛР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распопов В. Я.* Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54—54.
2. *Зиновьев А. В., Гузий А. Г.* Информационные комплексы для автономных автоматических систем посадки // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 8. С. 40—49.
3. *Иванов В. П.* Оптимизация управления динамическими системами на границе допустимого множества управлений методом огибающих // Тр. СПИИРАН. 2007. Вып. 4. С. 270—276.
4. *Иванов В. П.* Оптимизация вырожденного управления динамическими системами методом огибающих // Тр. СПИИРАН. 2006. Вып. 3, т. 2. 2006. С. 358—365.
5. *Михалев И. А., Окоемов Б. Н., Чукулаев М. С.* Системы автоматической посадки. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
6. *Юревич Е. И.* Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
7. *Мамаев В. Я., Сняков А. Н., Петров К. К., Горбунов Д. А.* Воздушная навигация и элементы самолетовождения. СПб: СПбГУАП, 2002. 256 с.
8. *Черный М. А., Кораблин В. И.* Самолетовождение. М.: Транспорт, 1973. 368 с.
9. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. *М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова.* М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.
10. *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Механика, управление и информатика, 2011. № 6. С. 11—44.
11. *Алферев Г. В., Иванов В. О., Чернакова С. Э.* Устройство интеллектуального управления и обучения андроидными роботами // Процессы управления и устойчивость: Тр. 39-й науч. конф. аспирантов и студентов; Под ред. *Н. В. Смирнова, Г. Ш. Тамасяна.* СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. С. 97—104.
12. *Севостьянов Р. А., Заблоцкая А. В., Румянцев Н. Н., Иванов В. О.* Моделирование автоматической посадки АЛР с использованием интеллектуальной системы автоматического управления // Проблемы механики и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во Пермского гос. нац. исслед. ун-та, 2009. С. 148—155.
13. *Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П.* Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.

#### *Сведения об авторе*

**Валерий Олегович Иванов** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория прикладной информатики и проблем информатизации общества; E-mail: [ivanov4mail@gmail.com](mailto:ivanov4mail@gmail.com)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

В. В. ТИТОВ

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАТЛИВЫМ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРА С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ШАРНИРНЫХ СОЧЛЕНЕНИЯХ

Рассматриваются подходы к управлению податливым движением манипуляторов с упругими элементами в шарнирных сочленениях. Приведен краткий анализ подходов и представлен вариант улучшения динамических показателей существующих регуляторов.

**Ключевые слова:** манипулятор, робот, силомоментное управление, шарнирные сочленения.

**Введение.** Одним из основных требований к манипуляционным операциям в робототехнике является успешное осуществление контактных взаимодействий с внешней средой. Необходимость выполнения подобных операций дала начало направлению в робототехнике, связанному с очувствлением по моментам и усилиям взаимодействия (или силомоментному управлению). Это направление активно развивалось последние 30—40 лет. В результате в робототехнике сформировались несколько подходов к выполнению силомоментных операций (см., например, [1]).

Для осуществления силомоментного управления требуется использовать датчики сил и моментов, расположенные в шарнирах манипулятора либо в запястье схвата (имеются и другие точки зрения: см., например, [2]). В основе измерения усилий, возникающих в датчиках момента, лежит измерение величины деформаций механических элементов конструкции датчика [3].

Использование датчиков момента в шарнирах манипуляторов, а также волновых редукторов обуславливает существенную упругость/податливость механических передач сочленений робота. Упругость механических передач приводит к значительному количеству негативных эффектов, сказывающихся на динамике манипулятора и усложнении процесса управления им. Наиболее податливыми элементами конструкции манипулятора являются шарнирные сочленения, кистевой датчик сил и моментов, а также звенья манипулятора.

Основными целями при управлении манипуляторами с упругими элементами в шарнирных сочленениях являются:

- минимизация дополнительных динамических эффектов, вызванных наличием упругого элемента между управляемым выходным валом сочленения и управляющим валом двигателя, развивающего момент;
- увеличение механической податливости манипулятора при сохранении точности отработки манипуляционных операций.

Отметим, что в области управления манипуляторами с упругими элементами в шарнирных сочленениях за последние 30 лет были достигнуты значительные успехи, некоторые из которых упомянуты в обзоре [4].

**Модель объекта управления.** Примем, для упрощения дальнейших выкладок, что все сочленения манипулятора являются вращательными парами (степенями подвижности). Кроме того, будем считать, что датчики моментов расположены в сочленениях манипулятора.

Уравнения динамики движения таких манипуляторов, построенные исходя из уравнения Лагранжа второго рода (см., например, [5]), получают сильносвязными и трудно анализируемыми. В этой связи в большинстве работ применяется упрощенная модель Спонга, получаемая введением ряда допущений и имеющая следующий вид [6]:

$$\left. \begin{aligned} B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= T + DK^{-1}\dot{T} + T_{\text{ext}}; \\ J_m\ddot{\alpha} + T + DK^{-1}\dot{T} &= T_m; \\ T &= -K\theta = K(\alpha - q), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — вектор углов поворота выходных валов двигателя до достижения валом упругого элемента,  $\ddot{\alpha} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$ ;  $q$  — вектор углов поворота выходных валов, расположенных после упругого элемента,  $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$ ,  $\ddot{q} = \frac{d^2q}{dt^2}$ ,  $q_i = \theta_i + \alpha_i$ ;  $\theta$  — вектор угловых деформаций упругих элементов;  $B(q)$  —  $n \times n$ -матрица инерции манипулятора;  $C(q, \dot{q})$  — моменты кориолисовых и центробежных сил;  $g(q)$  — моменты силы тяжести;  $T$  — момент деформации упругих элементов,  $\dot{T} = \frac{dT}{dt}$ ;  $T_m$  — развиваемый двигателем момент;  $T_{\text{ext}}$  — момент внешних сил;  $D$  —

диагональная матрица коэффициентов внутреннего вязкого трения в упругих элементах;  $K$  — диагональная матрица коэффициентов жесткости упругих элементов;  $J_m$  — диагональная матрица инерции роторов двигателей (приведенных к выходным валам).

Запись уравнений (1) относительно переменных состояния  $(q, \dot{q}, T, \dot{T})$ , являющихся, как правило, доступными для измерения, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= T + DK^{-1}\dot{T} + T_{\text{ext}}, \\ J_m K^{-1}\ddot{T} + DK^{-1}\dot{T} + T &= T_m - J_m B^{-1}(q)(T + DK^{-1}\dot{T} + T_{\text{ext}} - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

**Алгоритмы управления.** В задачу системы управления силомоментно-очувствленными роботами входит как регулирование положения характерной точки манипулятора (например, схвата), так и регулирование усилия, развиваемого в этой точке.

Следуя методу, изложенному в работе [7], построим систему управления манипулятором с помощью точной линеаризации. Выражение для  $T_m$ , позволяющее точно линеаризовать системы уравнений (1), (2), имеет вид

$$T_m = J_m^{-1} D^{-1} (B(q)u + \dot{B}(q)\dot{q} + \dot{n}(q, \dot{q})) + J_m^{-1}\ddot{q} + T + (DK^{-1} - J_m^{-1}D^{-1})\dot{T}, \quad (3)$$

где  $n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$ ,  $u$  — сигнал управления.

При замыкании системы (1) с использованием выражения (3) для момента привода выполняется уравнение  $\ddot{q} = u$ .

Точная линеаризации не является самым простым способом управления, так как требует значительных вычислительных затрат, а именно: вычисления линеаризующей обратной связи (3) и вычисления двух производных по времени от  $q$ , а также первой производной от момента  $T$ .

В работе [8] управление роботом с упругими элементами в шарнирных сочленениях исследовалось с позиций теории сингулярных возмущений, согласно которой первые два уравнения системы (1) могут рассматриваться независимо, так как переходные процессы, описываемые вторым выражением, происходят намного быстрее, чем в первом. Поэтому предлагается использовать отдельные контуры управления: контур управления моментами упругих элементов (быстрый контур, с локальной линеаризацией) и контур управления положением по типу импедансного (медленный контур). Основным недостатком предложенного подхода является необходимость использования в быстром контуре управления данных, поставляемых медленным контуром управления. Для линеаризации в быстром контуре также требуется вы-

числение или изменение величин  $T_{\text{ext}}$  либо  $\ddot{q}$ , что вызывает дополнительные трудности и не всегда представляется возможным.

В более поздних исследованиях были предложены варианты управления манипулятором на основе свойства пассивности (passivity based control) динамических систем. Так, в работе [9] используется обратная связь по  $\alpha$  и  $\dot{\alpha}$ , за счет чего обеспечивается свойство пассивности самого контроллера. В этой работе рассматривается модель, аналогичная модели Спонга (1), а в качестве контура управления моментом предложен регулятор, описываемый выражением

$$T_m = J_m \tilde{J}_m^{-1} u + T + DK^{-1}\dot{T} - J_m \tilde{J}_m^{-1} (T + D_s K^{-1}\dot{T}), \quad (4)$$

где  $\tilde{J}_m$  — диагональная матрица требуемых моментов инерции роторов двигателей (приведенных к выходным валам),  $D_s$  — положительно-определенная диагональная матрица демпфирования.

Регулятор положения выходных валов, используемый совместно с регулятором (4), характеризуется выражением [9]

$$u = -K_\alpha (\alpha - \alpha_d) - D_\alpha \dot{\alpha} + g(q_d), \quad \alpha_d = q_d + K^{-1}g(q_d), \quad (5)$$

где  $\alpha_d$  и  $q_d$  — векторы желаемых углов поворота выходных валов до и после достижения упругого элемента;  $K_\alpha, D_\alpha$  — положительно-определенные матрицы жесткости и демпфирования.

Уравнения динамики робота после замыкания имеют вид

$$\left. \begin{aligned} B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= -K_\alpha (\alpha - \alpha_d) - D_\alpha \dot{\alpha} + g(q_d) - \tilde{J}_m \ddot{\alpha} + T_{\text{ext}}, \\ \tilde{J}_m \ddot{\alpha} + T + D_s K^{-1}\dot{T} &= -K_\alpha (\alpha - \alpha_d) - D_\alpha \dot{\alpha} + g(q_d). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Регулятор (5) реализует аналог импедансного управления. Однако следует отметить, что установившаяся ошибка отработки конечного положения выходных валов  $K_\alpha (\alpha - \alpha_d) = T_{\text{ext}}$  при  $\ddot{q} = \dot{q} = 0$  не гарантирует (и не может гарантировать) высокую точность отработки при движении. Основным недостатком регулятора (5) является значительная погрешность отработки положения при выполнении динамических манипуляционных операций с сохранением требуемых импедансных свойств. Интересным представляется закон управления выходным моментом (4), позволяющий виртуально уменьшить значение момента инерции ротора двигателя.

Наиболее предпочтительным способом построения системы управления манипулятором является, как и в рассмотренных выше случаях, разделение процессов управления моментами упругих элементов и управления положением валов. Данное разделение целесообразно проводить также и на физическом уровне, принимая во внимание пропускную способность каналов связи. Кроме того, желательна как можно более точная отработка траектории при сохранении свойств податливости манипулятора.

Воспользуемся моделью динамики манипулятора, описываемого системой уравнений (2), совместно с регулятором момента (4). Тогда выражения для динамики замкнутой системы примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= u + (D - D_s)K^{-1}\dot{T} - \tilde{J}_m \ddot{q} - \tilde{J}_m K^{-1}\dot{T} + T_{\text{ext}}, \\ \tilde{J}_m K^{-1}\dot{T} + T + D_s K^{-1}\dot{T} &= u - \tilde{J}_m \ddot{q}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рассмотрим, далее, подход к линеаризации движения манипулятора при отсутствии упругости конструкции.

Следуя методике, изложенной в работе [1], введем закон управления

$$u = [B(q)\ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (8)$$

где  $\ddot{q}_d, \dot{q}_d, q_d$  — желаемые программные ускорения, скорости и положения выходных валов;  $K_D, K_P$  — положительно-определенные матрицы, определяющие динамику изменения погрешности отработки в отсутствие внешнего момента ( $T_{\text{ext}} = 0$ ). При  $T_{\text{ext}} = 0$  движение манипулятора можно описать уравнением

$$B(q)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) = 0,$$

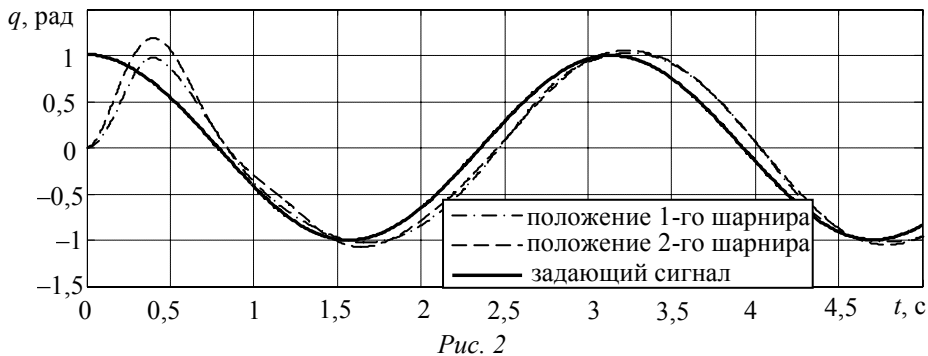
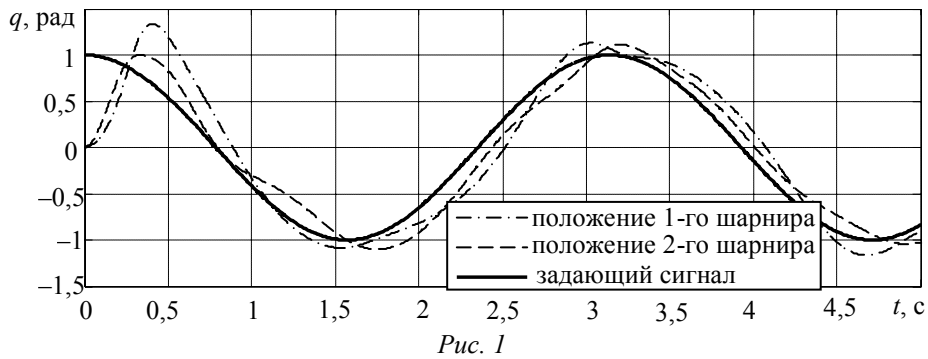
а при наличии внешнего момента  $T_{\text{ext}}$  — уравнением

$$B(q)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) = -T_{\text{ext}}.$$

Заметим, что полностью исключить взаимозависимость обобщенных координат манипулятора таким образом не удастся, так как остается составляющая  $B(q)$ . Однако удастся добиться взаимной независимости статических погрешностей отработки положений выходных валов:

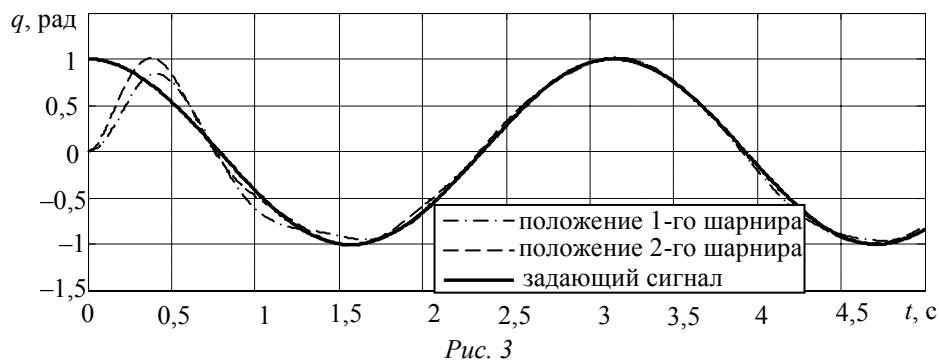
$$K_P(q_d - q) = -T_{\text{ext}}.$$

**Результаты моделирования.** Компьютерное моделирование предложенного алгоритма (см. формулы (4), (8)) проводилось на модели двухстепенного пространственного робота-манипулятора. В качестве задающего воздействия на каждый из шарниров подавался косинусоидальный сигнал по положению единичной амплитуды (1 рад). В качестве контура управления моментом использовался регулятор (4) с одинаковой настройкой для всех экспериментов; настройки параметров сравниваемых регуляторов (5) и (8) были идентичны ( $K_\alpha = K_P$ ,  $D_\alpha = K_D$ ). На рис. 1 и 2 соответственно приведены результаты моделирования работы регулятора (5) и регулятора (8) с неполным задающим сигналом (т.е. при  $\ddot{q}_d = 0$ ,  $\dot{q}_d = 0$ ,  $q_d = q_d(t)$ ). Сравнительный анализ результатов показал, что регулятор (8) проявил себя лучше, имея практически только фазовое отставание от задающего сигнала.



Применение полного задающего сигнала ( $\ddot{q}_d = \ddot{q}_d(t)$ ,  $\dot{q}_d = \dot{q}_d(t)$ ,  $q_d = q_d(t)$ ) намного улучшает результат, как видно из рис. 3.





Предлагаемый регулятор (8) имеет, тем не менее, ряд недостатков: значительную зависимость качества управления от точности задания массоинерционных параметров модели робота, используемой в регуляторе; затрудненный анализ устойчивости вследствие большей связности по сравнению с регулятором (5).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. London: Springer, 2009.
2. Кулаков Ф. М. Активное силомоментное управление роботами без использования запястных силомоментных сенсоров // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2012. № 1. С. 149—170.
3. Гориневский Д. М., Формальский А. М., Шнейдер А. Ю. Управление манипуляционными системами на основании информации об усилиях / Под ред. В. С. Гурфинкеля и Е. А. Девятина. М.: Физматлит, 1994.
4. Ozgoli S., Taghirad H. D. A survey on the control of flexible joint robots // Asian J. of Control. 2006. Vol. 8, N 4. P. 1—15.
5. Козлов В. В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В., Юревич Е. И. Динамика управления роботами. М.: Наука, 1984.
6. Spong M. Modeling and control of elastic joint robots // IEEE J. of Robotics and Automation. 1987. P. 291—300.
7. Дыда А. А. Адаптивное и нейросетевое управление сложными динамическими объектами. Владивосток: Дальнаука, 2006.
8. Ott C., Albu-Schaffer A., Kugi A., Hirzinger G. Decoupling based cartesian impedance control of flexible joint robots // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. 2003. Vol. 3. P. 3101—3107.
9. Albu-Schaffer A., Ott C., Hirzinger G. A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible // The Intern. J. of Robotics Research. 2007. Vol. 26. P. 23—39.

#### Сведения об авторе

**Виктор Викторович Титов** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в управлении и робототехнике; E-mail: victortitov2005@mail.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

Е. А. ЛАТУХИНА

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ГАСТРОЭНТЕРОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Рассматриваются вопросы организации информационной системы хранения и обработки гастроэнтерографических данных. Приводится схема системы, формулируются требования к ее реализации с учетом возможностей удаленной работы.

**Ключевые слова:** электрогастроэнтерография, система хранения данных, медицинская информационная система.

**Введение.** Электрогастроэнтерография (ЭГЭГ) — неинвазивный метод оценки моторно-эвакуаторной функции желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), основанный на частотном разделении и анализе сигналов, снимаемых с поверхности тела пациента. Колебания мышц органов ЖКТ создают медленные перистальтические волны [1], которые преобразуются в биоэлектрические сигналы, регистрируемые при помощи *электроэнтерогастрографов* [2].

Сигналы биоэлектрической активности могут быть усилены одновременно по нескольким каналам, отфильтрованы и преобразованы периферийным оборудованием компьютера. Использование методов обработки сигналов позволяет перейти от субъективного анализа кривых к оценкам числовых параметров, показывающим, как развивается заболевание того или иного органа, либо, наоборот, насколько успешно идет лечение с течением времени. Например, типовое значение доминантной частоты электрических колебаний, поступающих от желудка, составляет 0,05 Гц у пациентов группы „норма“; для двенадцатиперстной кишки эта величина равна 0,2 Гц, для тонкой кишки — 0,15 Гц, для толстой — 0,1 Гц. При обследовании больных пациентов наблюдаются отклонения от данных стандартных значений.

Электрогастроэнтерография обладает преимуществами беззондового способа оценивания двигательной активности ЖКТ, то есть не требует введения в организм человека инородных предметов.

Работы по созданию аппаратных и программных средств диагностики методами селективной ЭГЭГ в течение последних нескольких лет проводились в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН и в Поморском государственном университете им. М. В. Ломоносова (Архангельск) [3, 4]. В настоящее время в рамках проекта в Северном (Арктическом) федеральном университете им. М. В. Ломоносова (Архангельск) в сотрудничестве с Норвежским центром телемедицины исследуется возможность применения методов селективной ЭГЭГ для жителей удаленных территорий Баренц-региона.

Имеющаяся система предназначена для локального использования, что существенно затрудняет ее применение в условиях распределенной работы с данными. Поэтому необходимо создание универсальной системы, способной работать как изолированно, так и в глобальной компьютерной сети с возможностью объединения данных из разных источников и их последующей обработки.

**Организация медицинской информационно-измерительной системы** (общая схема представлена на рис. 1). Система предназначена для компьютерной поддержки неинвазивной методики обследования органов ЖКТ. Для представления системы использована диаграмма прецедентов методологии UML (Unified Modeling Language). В качестве действующих лиц выступают как люди (регистратор, врач, статистик), так и программы (регистрирующая и обрабатывающая программы, система хранения данных).

Регистрирующая программа осуществляет запись биоэлектрического сигнала (с электродов, расположенных, при селективной ЭГЭГ, на конечностях пациента), его фильтрацию и частотное разделение. Возможно построение графиков электрогастроэнтерограмм в режиме реального времени.

Обрабатывающая программа по записи сигнала строит графики гастрограмм и рассчитывает числовые коэффициенты, например доминантные частоты сигналов. Результаты работы программы могут быть проанализированы специалистом-медиком.

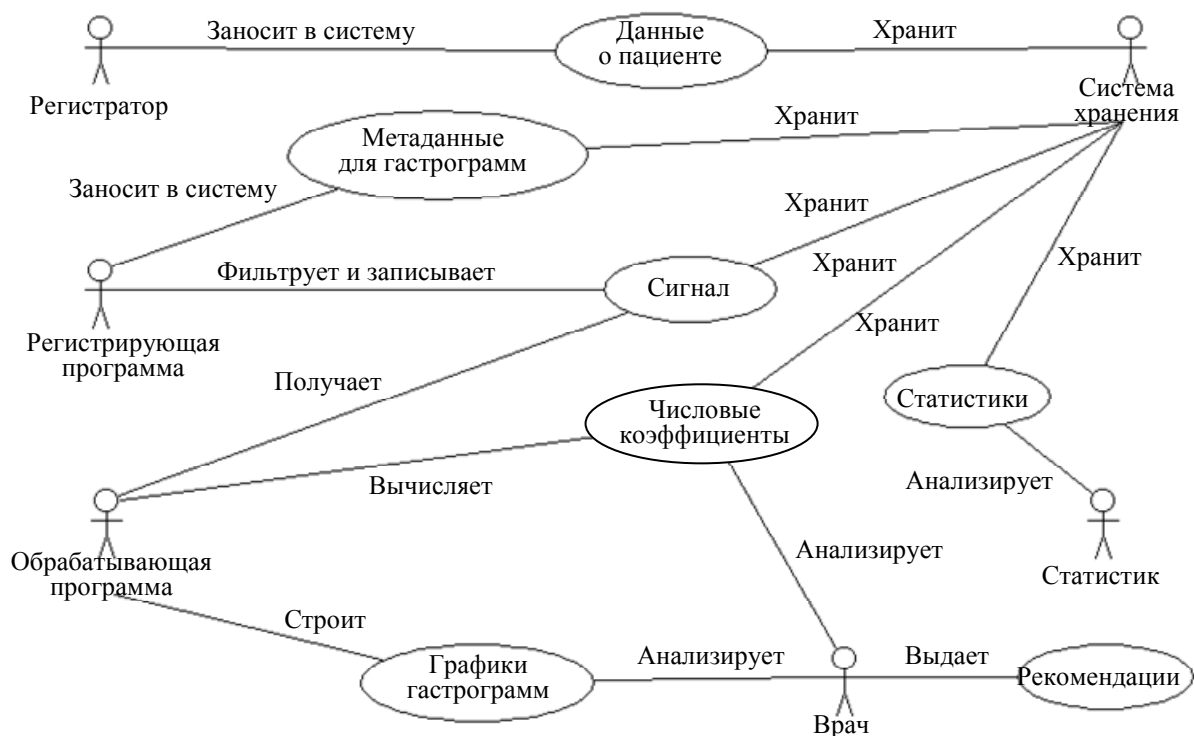


Рис. 1

Разделение программного обеспечения (ПО) на регистрирующее, обрабатывающее и систему хранения позволяет модифицировать его части, не изменяя общую схему организации ПО. Кроме того, появляется возможность использования стороннего аппаратного и программного обеспечения, предназначенного для регистрации сигналов, с внесением небольших дополнений в обрабатывающее ПО и систему хранения данных.

**Система хранения данных.** Данные, которые необходимо сохранять, можно разделить на следующие группы: данные о пациенте, история болезни — строковые и числовые поля; рассчитанные характеристики сигналов — числовые поля; записи электрогастроэнтерограмм — массивы чисел с плавающей точкой, содержащие до 36 000 элементов. При этом для каждого пациента таких наборов может быть несколько десятков.

Первоначально система хранения данных была организована следующим образом. Информация о пациенте хранилась в базе данных MS Access, а данные обследований содержались в текстовых файлах. Для каждого обследования создавались файл с характеристиками записи и несколько файлов, в каждом из которых содержалась запись только одного канала обследования. Подобная организация системы хранения не отвечает требованиям защиты конфиденциальной информации и не может быть использована в реальных условиях.

Впоследствии в качестве системы управления базой данных (СУБД) было решено использовать библиотеку SQLite, обладающую следующим набором достоинств: встраиваемая СУБД; возможность работы с BLOB-полями, в которых можно хранить записи сигналов; язык программирования C++; совместимость с библиотекой Qt, используемой для написания

остального программного обеспечения системы. Кроме того, библиотека SQLite является общественным достоянием, потому ее можно использовать без каких-либо ограничений [5].

Недостаток подобного подхода заключается в том, что эта база данных является локальной и может быть использована лишь тогда, когда вся система работает только на одном компьютере. В случае удаленной работы возникает необходимость перехода к комплексной, универсальной системе хранения данных для гастроэнтерологии, содержащей информацию как о контингенте пациентов, так и о наборе методов регистрации показателей, а также большой объем записей гастроэнтерограмм с возможностью хранения данных как в локальной базе, так и на сервере.

Исходя из вышеизложенного можно сформулировать следующие требования к системе хранения данных: возможность хранения простых полей и длинных полей (записей сигналов); обеспечение хранения информации как локально, так и на сервере; консолидация данных, полученных из источников различных типов и расположенных в разных местах; возможность поиска записей сигналов с определенными признаками и поиска групп пациентов с определенными заболеваниями; защита передачи и хранения данных.

Таким образом, универсальная система хранения должна содержать несколько баз данных (рис. 2). Регистрирующая программа может сохранять информацию как в локальной базе данных, так и в удаленной. Информация из локальной базы данных может быть передана в удаленную базу без использования регистрирующей программы. Локальных баз данных может быть несколько. Подобная организация системы позволяет консолидировать в одной базе данные из разных источников, не теряя при этом работоспособности в случае невозможности передачи информации в общую базу в процессе записи. В случае использования стороннего программного обеспечения информация сохраняется во входящей в его состав базе данных, а затем может быть передана в удаленную базу данных и объединена с информацией, полученной из других источников. Это позволит применять одинаковые методы анализа к различным данным.

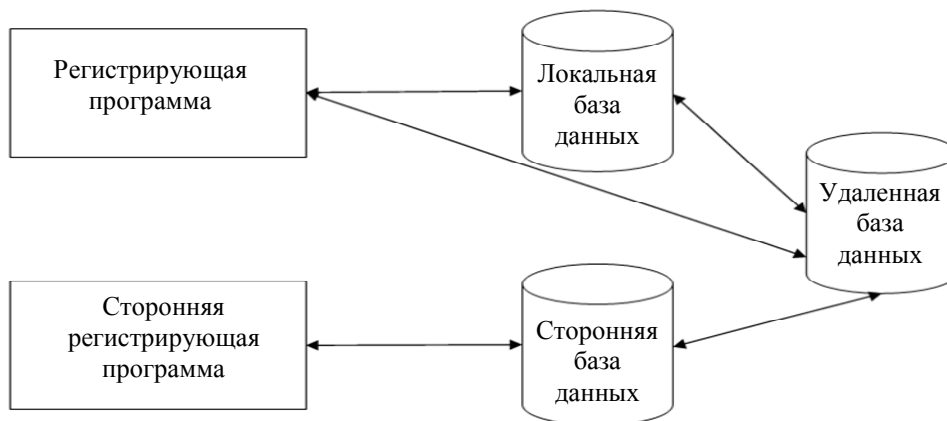


Рис. 2

Для удобства работы локальная и удаленная базы данных должны иметь одинаковый интерфейс. Наиболее очевидным является использование веб-интерфейса. Это позволит работать с формами и отчетами в браузере, осуществляя передачу данных по защищенному протоколу, что отвечает обозначенным выше требованиям безопасности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. А., Васильева А. В. Электромиография органов желудочно-кишечного тракта и периферическая электрогастрография [Электронный ресурс]: <<http://www.gastroscan.ru/literature/authors/3174>>.
2. Пат. 2023419 РФ. Селективный электроэнтерогастрограф / В. Н. Яковенко, С. В. Яковенко // Бюлл. „Открытия, изобретения“. 1994. № 22.

3. Свиньин С. Ф., Комякова К. В., Каримов С. Х. Программно-инструментальный комплекс для функциональной диагностики в хирургической гастроэнтерологии // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 71—74.
4. Свиньин С. Ф., Хаймина Л. Э., Латухина Е. А., Попов А. И. Медицинская информационно-измерительная система функциональной диагностики // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 12. С. 11—16.
5. Латухина Е. А., Свиньин С. Ф. Выбор СУБД для хранения гастроэнтерологических данных // Материалы XII Санкт-Петербургской междунар. конф. „Региональная информатика — 2010“. СПб, 2010. С. 283.

**Сведения об авторе****Екатерина Александровна Латухина**

— Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, Институт математики, информационных и космических технологий, кафедра программирования и высокопроизводительных вычислений, Архангельск; ст. преподаватель;  
E-mail: ealatukhina@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

---

---

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЧИ

---

---

УДК 004.522

А. А. КАРПОВ, И. С. КИПЯТКОВА

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Представлена современная методология количественного оценивания результатов работы автоматических систем распознавания и диаризации речи. Приведены различные показатели и методы оценивания по критериям точности распознавания речи и скорости обработки речевого сигнала.

*Ключевые слова:* автоматическое распознавание речи, точность распознавания речи, скорость обработки сигнала, критерии и показатели оценивания.

**Введение.** Одной из основных проблем в работе систем автоматического распознавания речи является объективное количественное оценивание результатов распознавания, что имеет важное значение как для разработчиков, так и для конечных пользователей систем. Методология количественного оценивания производительности предназначена для сравнения и сопоставления различных систем распознавания, в ней выделяют критерий, показатель и метод:

— критерий — это область оценивания, т.е. то, что необходимо оценить: например, точность распознавания речи, скорость ее обработки, робастность и т.п.;

— показатель (мера или метрика) определяет конкретное свойство, которое оценивается для выбранного критерия: например, процент правильно распознанных слов, время обработки сигнала, уровень максимально допустимого шума при сохранении работоспособности и т.п.

— метод — это способ определения соответствующего значения для данного показателя: например, сравнение распознанных слов с последовательностью сказанных слов, оценка времени обработки в секундах и т.п.

При разработке систем автоматического распознавания речи, как правило, используются три набора данных: обучающий (“train”), отладочный (“dev”), оценочный или тестовый (“eval”). Обучающий набор данных (обычно это наибольшая часть речевых данных) применяется только для создания и обучения/тренировки системы; отладочный набор используется для настройки и адаптации параметров автоматической системы перед финальной стадией оценивания, этот набор данных должен иметь тот же формат, что и тестовые данные; оценочный набор содержит речевые данные, которые не использовались для обучения и настройки системы и доступны только при ее окончательной оценке.

Предметом рассмотрения в данной статье являются показатели точности и скорости распознавания речи.

**Показатели точности распознавания речи.** В системах автоматического распознавания речи основным показателем качества является точность распознавания, которая определяется как процент правильно распознанных слов (WRR — Word Recognition Rate) или, на-

оборот, неправильно распознанных слов (WER — Word Error Rate). Иногда также используется показатель ошибок распознавания фраз/предложений (SER — Sentence Error Rate), который является важным в диалоговых системах, где корректировка гипотезы распознавания невозможна в отличие от задачи диктовки текста. В последнее время в качестве основного показателя точности работы систем распознавания речи используется показатель WER, а именно, его абсолютное значение или относительное, если сравниваются различные модели/системы. Поскольку с развитием речевых технологий показатель WER все более приближается к нулю, то улучшение его значения более наглядно, чем повышение точности распознавания слов. Метод определения показателя WER состоит в выравнивании двух текстовых строк (первая — это результат распознавания, а вторая — запись того, что было сказано в действительности) с помощью алгоритма динамического программирования с вычислением расстояния Левенштейна [1]. Расстояние Левенштейна представляет собой „стоимость“ редактирования данных (минимальное количество или взвешенная сумма операций редактирования [2]) для преобразования первой строки во вторую с наименьшим числом операций ручной замены ( $S$ ), удаления ( $D$ ) и вставки ( $I$ ) слов:

$$\text{WER} = \frac{S + D + I}{T}, \quad \text{WRR} = 1 - \text{WER},$$

где  $T$  — количество слов в распознаваемой фразе.

Для оценивания результатов автоматического распознавания речи используется и такой показатель, как процент корректно распознанных слов (WCR — Word Correctly Recognized), который не учитывает ошибочные вставки слов, сделанные системой:

$$\text{WCR} = \frac{H}{T} \cdot 100\%, \quad H = N - D - S,$$

где  $H$  — количество правильно распознанных слов.

WER — интуитивно понятный показатель качества распознавания для аналитических языков с достаточно простой морфологией, в которых грамматические значения однозначно выражаются самим словом (например, английский или французский). Однако синтетические языки (например, агглютинативные финский, турецкий или флективные русский, украинский) имеют богатую морфологию словообразования; в некоторых азиатских языках (китайском, корейском и т.п.) используются слоги взамен слов; в тайском языке отсутствуют явные разделители границ слов. Поэтому эти языки могут синтезировать достаточно длинные осмысленные словоформы из нескольких частей (морфем), определяющих грамматические признаки. Обычно конец словоформы произносится в беглой речи не так четко, как начальная часть слова, что приводит к акустической неопределенности и в среднем к более высоким по сравнению с аналитическими языками значениям показателя WER.

В синтетических языках для оценивания точности автоматического распознавания речи могут применяться другие показатели: ошибки распознавания букв/символов [3], фонем (звуков речи) [4], слогов [5] или морфем [6]. Кроме того, для некоторых синтетических языков (например, русского) адекватным их структуре показателем является флективная ошибка распознавания слов (IWER — Inflectional Word Error Rate) [7], которая определяется следующим образом:

$$\text{IWER} = \frac{S_{\text{hard}} \cdot C_{\text{hard}} + S_{\text{soft}} \cdot C_{\text{soft}} + D + I}{T}, \quad C_{\text{soft}} < C_{\text{hard}}, \quad C_{\text{hard}} \geq 1, \quad 0 \leq C_{\text{soft}} < 1.$$

Показатель IWER приписывает вес  $C_{\text{hard}}$  всем неверным заменам слов, которые приводят к замене лексемы слова, т.е. к грубым ошибкам распознавания ( $S_{\text{hard}}$  — количество ошибок), и меньший вес  $C_{\text{soft}}$  — всем негрубым ошибкам в словах, где было неверно распознано окончание словоформы, но основа слова распознана правильно ( $S_{\text{soft}}$  — количество негрубых ошибок).

При оценивании точности автоматического распознавания речи по показателю WER предполагается, что все слова во входной (поступающей на вход системы) фразе одинаково информативны и важны. Однако очевидно, что в системах, отличных от диктовки текста, например в диалоговых или в системах понимания (смысла) речи, некоторые значащие (ключевые) слова более важны, чем остальные (функциональные слова, предлоги, слова-заполнители и т.п.). В работе [8] предложено оценивать точность распознавания, используя взвешенный показатель неправильно распознанных слов (WWER — Weighted Word Error Rate), который определяется как

$$\text{WWER} = \frac{V_S + V_D + V_I}{V_T},$$

$$V_T = \sum_{W_i \in T} v_{W_i}, V_I = \sum_{\hat{W}_i \in I} v_{\hat{W}_i}, V_D = \sum_{W_i \in D} v_{W_i}, V_S = \sum_{s_j \in S} v_{s_j}, v_{s_j} = \max \left( \sum_{\hat{W}_i \in s_j} v_{\hat{W}_i}, \sum_{W_i \in s_j} v_{W_i} \right),$$

где  $v_{W_i}$  — вес слова  $W_i$ , которое является  $i$ -м во входной фразе, и  $v_{\hat{W}_i}$  — вес слова  $\hat{W}_i$ , которое является  $i$ -м в гипотезе распознавания;  $s_j$  —  $j$ -й замененный фрагмент фразы (или одно слово) и  $v_{s_j}$  — вес данного фрагмента  $s_j$ .

Таким образом, согласно показателю WWER каждое слово может иметь различный вес (установленный экспертом или полуавтоматически) в соответствии с его влиянием на последующее понимание смысла сказанной фразы.

Национальным институтом стандартов и технологий (NIST, США) недавно был предложен такой показатель, как количество неправильно распознанных слов в речи каждого из дикторов (SAWER — Speaker Attributed Word Error Rate) — для задачи стенографирования совещаний [9], в которых предполагается участие нескольких дикторов. Данная задача объединяет технологии автоматического распознавания речи и диаризации голоса диктора (разметки звукового сигнала на фрагменты „кто и когда говорил“ — “Who Spoke When”) [10]. Результатом этой объединенной системы является текстовая транскрипция входного одноканального звукового сигнала для каждого распознанного слова с явным указанием на говорящего. Показатель SAWER определяется следующим выражением:

$$\text{SAWER} = \frac{S + D + I + V}{T},$$

где  $V$  — количество слов (или других языковых единиц), правильно распознанных системой автоматического распознавания речи, но с неправильной идентификацией диктора по результатам диаризации.

Однако следует понимать, что процент неправильного распознавания — это в действительности только количественный показатель точности распознавания (количество ошибок распознавания на фразу или слово), но не вероятность распознавания слова во фразе, так как показатель WER не ограничивается интервалом вероятности [0; 1] и не имеет верхнего предела. Например, представим, что кто-то произнес фразу, состоящую из 10 слов, но система ее полностью распознала неправильно и предложила гипотезу из 15 других слов. В этом случае  $\text{WER} = 150\%$  ( $S=10, I=5, H=D=0$ ), и, следовательно, показатель точности WRR отрицательный (т.е.  $-50\%$ ), что не имеет смысла. Для того чтобы решить эту проблему, недавно были предложены другие показатели, в частности: ошибка распознавания соответствий (MER — Match Error Rate) и показатель потери информации, содержащейся в словах (WIL — Word Information Lost) [11], основанные на величине относительной потери информации и определяемые следующим образом:

$$\text{MER} = \frac{S + D + I}{T_p = H + S + D + I} = 1 - \frac{H}{T_p}; \quad \text{WIL} = 1 - \frac{H^2}{T \cdot T_o}, \text{ если } H \gg S + D + I,$$



где  $T_O$  — количество слов в гипотезе распознавания; однако оба этих показателя редко применяются, так как обеспечивают обычно несколько меньшую точность распознавания по сравнению со стандартными показателями.

Все названные выше показатели учитывают только одну наилучшую гипотезу распознавания каждой произнесенной фразы, и совсем не обязательно, что этот единственный результат распознавания окажется действительно правильным. Однако некоторые системы автоматического распознавания речи (например, фонетический декодер) способны выдавать сразу несколько гипотез распознавания с наибольшими вероятностями — так называемый список  $N$  лучших гипотез (N-best List). Дополнительным показателем для оценки таких результатов является показатель ошибок распознавания слов в списке лучших гипотез [12], который оценивается путем выбора из  $N$  гипотез, ранжированных по уменьшению оценки правдоподобия, единственной гипотезы, имеющей наименьший уровень ошибок. Показатель WER гипотезы с минимальным уровнем ошибок по каждой входной фразе выбирается как основной результат распознавания, характеризующий процент ошибок распознавания в списке  $N$  лучших гипотез.

При моделировании и распознавании речи на основе теории вероятностей также используются доверительные интервалы для того, чтобы показать значимость результатов. При оценивании результатов автоматического распознавания речи доверительный интервал (confidence interval) иногда указывается вместе со средним значением показателя WER (например,  $WER=18,5 \pm 2,3 \%$ ). В общем случае доверительные интервалы показывают, во-первых, какое значение показателя WER можно ожидать при изменении набора тестовых данных, во-вторых, насколько значимым является предложенное улучшение модели распознавания. Однако на практике доверительные интервалы показателя WER оказываются весьма широкими, что объясняется высокой вариативностью речи и голоса дикторов, а также речевыми сбоями (некоторые фразы распознаются с нулевым показателем WER, но другие приводят к очень высокому уровню ошибок). Большинство производимых улучшений в моделях автоматического распознавания речи не вызывают изменения значений, выходящих за пределы доверительного интервала, из-за ограниченности наборов тестовых данных, что несколько снижает значимость результатов. Однако как новые, так и базовые методы распознавания речи обычно оцениваются разработчиками исходя из одинаковых тестовых данных (эти речевые данные не являются в разных сравниваемых моделях распознавания независимыми); в этом случае при количественной оценке точности распознавания доверительные интервалы могут не рассматриваться. Но в случае когда модели распознавания тестируются с использованием различных и независимых тестовых наборов, требуется вычисление доверительного интервала дополнительно к среднему значению показателя WER [13].

**Показатели скорости распознавания речи.** Второй важный критерий работы системы автоматического распознавания речи — скорость обработки речи. Скорость обработки вычисляется, как правило, с использованием меры, называемой показателем скорости (SF — Speed Factor) и также известной как показатель реального времени (RT — Real Time) [9], который определяется отношением общего времени обработки, требуемого для анализа всей записанной речи на одном ядре процессора, к длительности исходного анализируемого аудиосигнала. Например, если 10-минутный аудиофайл обрабатывается системой распознавания речи в течение 5 минут, то  $SF=0,5 RT$ , если файл обрабатывается в течение 20 минут, то  $SF=2,0 RT$ , что значительно хуже. Скорость обработки может быть также указана в абсолютных значениях времени (например, количество минут/секунд для обработки входного сигнала), однако это не является наглядным. Другим показателем скорости автоматического распознавания речи может быть период ожидания обработки отсчета (SPL — Sample Processing Latency) [9]. Этот показатель означает максимальное количество аудиоданных, которое алгоритм распознавания должен обработать до выдачи результата о первом отсчете сигнала.

При создании обладающей (сверх)большим словарем системы автоматического распознавания речи, которая работает в реальном масштабе времени с использованием микрофона (онлайн режим), часто требуется найти компромисс между точностью распознавания и скоростью обработки. Настройка некоторых параметров системы может улучшить точность распознавания, но уменьшить скорость обработки. В этом случае может быть полезным график зависимости показателя WER от скорости распознавания в некоторых контрольных точках [14]; результаты анализа этого графика позволяют выбрать оптимальные параметры системы.

**Заключение.** Представлен аналитический обзор различных критериев, количественных показателей и методов, применяемых для оценки результатов работы систем автоматического распознавания и диаризации речи. Рассмотрены основные и альтернативные показатели качества, такие как точность и корректность распознавания речи, ошибка распознавания фраз, слов и символов, скорость обработки речевого сигнала и ряд других.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при поддержке Минобрнауки РФ (федеральная целевая программа „Исследования и разработки“, госконтракт № 07.514.11.4139); совета по грантам Президента РФ (проект № МК-1880.2012.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-01265-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levenshtein V. I.* Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals // *Sov. Phys. Dokl.* 1966. Vol. 6. P. 707—710.
2. *Khokhlov Y., Tomashenko N.* Speech recognition performance evaluation for LVCSR system // *Proc. of the 14th Intern. Conf. “Speech and Computer” SPECOM—2011, Kazan, Russia.* 2011. P. 129—135.
3. *Kurimo M., Creutz M., Varjokallio M., Arsoy E., Saraclar M.* Unsupervised segmentation of words into morphemes — Morpho challenge 2005 Application to automatic speech recognition // *Proc. Interspeech-2006, Pittsburgh, PA.* 2006. P. 1021—1024.
4. *Schlippe T., Ochs S., Schultz T.* Grapheme-to-phoneme model generation for indo-european languages // *Proc. ICASSP-2012, Kyoto, Japan.* 2012.
5. *Huang C., Chang E., Zhou J., Lee K.* Accent modeling based on pronunciation dictionary adaptation for large vocabulary Mandarin speech recognition // *Proc. Interspeech-2000, Beijing, China.* 2000. P. 818—821.
6. *Ablimit M., Neubig G., Mimura M., Mori S., Kawahara T., Hamdulla A.* Uyghur morpheme-based language models and ASR // *Proc. of the 10th IEEE Intern. Conf. on Signal Processing ICSP-2010, Beijing, China.* 2010. P. 581—584.
7. *Karpov A., Kipyatkova I., Ronzhin A.* Very large vocabulary ASR for spoken russian with syntactic and morphemic analysis // *Proc. Interspeech-2011, Florence, Italy.* 2011. P. 3161—3164.
8. *Nanjo H., Kawahara T.* A new ASR evaluation measure and minimum bayes-risk decoding for open-domain speech understanding // *Proc. ICASSP-2005, Philadelphia, PA.* 2005. P. 1053—1056.
9. The US NIST 2009 (RT-09) Rich Transcription Meeting Recognition Evaluation Plan [Электронный ресурс]: <<http://www.itl.nist.gov/iad/mig/tests/rt/2009/>>.
10. *Ронжин А. Л., Будков В. Ю.* Система протоколирования дикторов на базе алгоритма определения речевой активности в многоканальном аудиопотоке // *Речевые технологии.* 2010. № 3. С. 98—102.
11. *Morris A. C., Maier V., Green P.* From WER and RIL to MER and WIL: improved evaluation measures for connected speech recognition // *Proc. Interspeech- 2004, Jeju Island, Korea.* 2004. P. 2765—2768.
12. *Tran B.-H., Seide F., Steinbiss T.* A word graph based N-best search in continuous speech recognition // *Proc. ICSLP-96, Philadelphia, PA.* 1996. P. 2127—2130.
13. *Vilar J. M.* Efficient computation of confidence intervals for word error rates // *Proc. ICASSP-2008, Las Vegas, NV.* 2008. P. 5101—5104.
14. *Hruz M., Campr P., Dikici E., Kindirouglu A., Krnoul Z., Ronzhin Al., Sak H., Schorno D., Akarun L., Aran O., Karpov A., Saraclar M., Zelezny M.* Automatic fingersign to speech translation system // *J. on Multimodal User Interfaces.* 2011. Vol. 4, N 2. P. 61—79.

- Алексей Анатольевич Карпов** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; E-mail: karpov@iias.spb.su
- Ирина Сергеевна Кипяткова** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; E-mail: kipyatkova@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

УДК 004.896

А. Л. Ронжин, В. Ю. Будков

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДИАРИЗАЦИИ ДИКТОРОВ**

Рассматривается проблема диаризации (протоколирования) речи нескольких дикторов, записанной одно- или многоканальными аудиосистемами. Проанализированы современные подходы к решению проблемы и приведены методики оценивания эффективности работы систем диаризации.

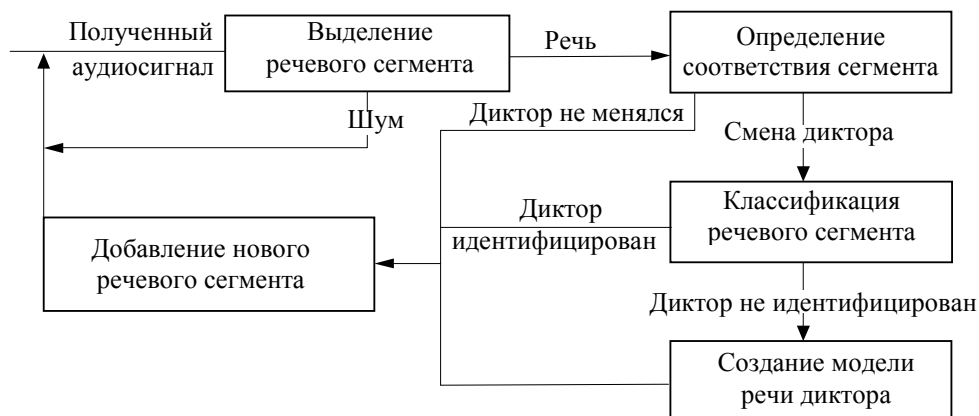
**Ключевые слова:** цифровая обработка аудиосигнала, протоколирование речи дикторов, уровень ошибок диаризации.

**Введение.** Задача протоколирования речи дикторов (Speaker Diarization — SD), также известная в зарубежной литературе под названием “Who Spoke When” (кто и когда говорил), заключается в сегментации входного звукового сигнала по типу аудиоинформации и его источнику [1—3]. Аудиосигнал может содержать речь диктора, одновременную речь нескольких дикторов, музыку, фоновые шумы. Наиболее перспективными областями применения систем диаризации дикторов являются:

— системы аннотирования, добавляющие к речевым аудиофайлам различные метаданные, такие как временная разметка границ фраз, информация о говорящем: это позволяет ускорить „ручной“ поиск данных и упростить их автоматизированную обработку;

— системы автоматического распознавания речи, использующие диаризацию дикторов для адаптации моделей фонем к речи пользователя, что повышает точность распознавания речи.

**Структура типовой системы диаризации.** Процесс протоколирования речи дикторов состоит из двух основных этапов: сегментации реплик каждого диктора в аудиосигнале и последующей группировки всех сегментов по принадлежности к каждому из дикторов [2]. Структура типовой системы диаризации дикторов приведена на рисунке.



Вначале определяются фрагменты, содержащие паузы или шумы, и выделяются границы речевого сегмента. Полученный речевой сегмент используется для определения (проверки) его

принадлежности (или отсутствия таковой) соответствующей модели речи текущего диктора. Если соответствие установлено, то выделенный речевой сегмент добавляется к аудиофайлу данного диктора. В случае замены диктора производится классификация сегмента по принадлежности к существующим моделям речи дикторов или создается модель речи нового диктора и сегмент помечается как принадлежащий последнему. Для повышения точности работы систем диаризации при обработке речевых сегментов могут приниматься во внимание дополнительные параметры — качество сигнала и пол диктора [2].

Рассмотрим основные методы обработки аудиосигнала, применяемые на каждом из уровней, указанных в структуре типовой системы диаризации.

**Методы обработки звукового сигнала.** Предварительное выделение из аудиосигнала фрагментов, содержащих тишину или речь, позволяет значительно сократить уровень ошибок системы диаризации и повысить скорость обработки данных. Методы определения речевой активности (Voice Activity Detection — VAD), основанные на оценке уровня энергии сигнала или его спектра и хорошо зарекомендовавшие себя при обработке речи, записанной с помощью одного микрофона, однако, не решают проблем, возникающих при обработке многоканальных аудиозаписей мероприятий с участием нескольких дикторов [4]. Для решения этой проблемы используются методы, основанные на нормализации энергии многоканального сигнала [5] и оценке степени корреляции между каналами [6], а также скрытые марковские модели, содержащие не два состояния (речь/тишина), как обычно в VAD-методах, а  $2K$  состояний, где  $K$  — количество дикторов [3]. Особенностью этих моделей является необходимый предварительный этап их обучения. Применение корреляционных методов возможно только при обеспечении синхронности многоканальной записи аудиопотоков.

Большинство современных систем протоколирования при построении моделей речи дикторов используют гауссовы смеси (Gaussian Mixture Models — GMMs). Данный подход позволяет обеспечить достаточно высокую точность работы систем, но требует предварительного обучения моделей, что ограничивает возможность применения этого метода в режиме реального времени. В работе [7] предложена оригинальная методика использования высокопроизводительных многоядерных процессоров параллельного вычисления, позволившая реализовать обучение моделей GMM.

При протоколировании речи дикторов наиболее часто применяется метод параметрического представления звукового сигнала с использованием признаков MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients), успешно зарекомендовавший себя также в системах распознавания речи [2]. В работе [8] предложены новые спектральные признаки, которые сравниваются с традиционными MFCC-признаками. В ходе экспериментов установлено, что применение новых признаков приводит к снижению ошибки диаризации на 15,4 %. Для протоколирования речи дикторов также дополнительно использовалась система локализации источника звука, что обеспечило снижение ошибки диаризации на 5,2 % [8].

Протоколирование мероприятий обычно основывается только на акустической информации [9]. Однако роль участников мероприятия и последовательность их выступлений связаны и статистически предсказуемы. В работе [10] описывается использование моделей  $N$ -грамм ролей участников для определения структуры (шаблона) дискуссии и применение этой структуры в работе системы протоколирования. Предложенный метод позволяет уменьшить ошибки системы протоколирования на 19 %, когда роль участника заранее известна, и на 17 %, когда она определяется системой в ходе обработки аудиозаписи [10].

**Методики оценивания эффективности работы систем диаризации.** Одна из основных методик оценивания систем диаризации [1] основана на вычислении уровня ошибок диаризации (Diarrization Error Rate — DER). Данная метрика показывает, какова длительность фрагмента аудиосигнала, просегментированного некорректно, т.е. с ошибками при иденти-

фикации диктора или при определении шума/речи. Показатель DER вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Error}_{\text{SpkrSeg}} = \frac{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})(\max(N_{\text{Ref}}(\text{seg}), N_{\text{Out}}(\text{seg}) - N_{\text{Correct}}(\text{seg}))) \}}{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})N_{\text{Ref}}(\text{seg}) \}},$$

где  $\text{dur}(\text{seg})$  — длительность некоторого речевого сегмента;  $N_{\text{Ref}}(\text{seg})$  — количество дикторов, речь которых присутствовала в этом сегменте;  $N_{\text{Out}}(\text{seg})$  — количество дикторов, определенное системой диаризации;  $N_{\text{Correct}}(\text{seg})$  — количество дикторов, речь которых была записана и которые корректно распознаны системой диаризации.

В приведенной формуле можно выделить следующие составляющие:  $\text{Error}_{\text{Spkr}}$  — длительность речевого сигнала, выделенного с ошибками при идентификации диктора:

$$\text{Error}_{\text{Spkr}} = \frac{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})(\min(N_{\text{Ref}}(\text{seg}), N_{\text{Out}}(\text{seg}) - N_{\text{Correct}}(\text{seg}))) \}}{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})N_{\text{Ref}}(\text{seg}) \}};$$

также точность сегментации аудиопотока с учетом индивидуальных особенностей речи дикторов можно оценить по числу ложных (False Alarm — FA) и пропущенных (Miss Rate — MS) сегментов речи; длительность ложных речевых сегментов (FA-rate) оценивается как

$$\text{Error}_{\text{FA}} = \frac{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})(N_{\text{Out}}(\text{seg}) - N_{\text{Ref}}(\text{seg})) \}}{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})N_{\text{Ref}}(\text{seg}) \}},$$

а длительность пропущенных речевых сегментов (MS-rate) — как

$$\text{Error}_{\text{MS}} = \frac{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})(N_{\text{Ref}}(\text{seg}) - N_{\text{Out}}(\text{seg})) \}}{\sum_{\text{allsegs}} \{ \text{dur}(\text{seg})N_{\text{Ref}}(\text{seg}) \}}.$$

Следует отметить, что, кроме перечисленных выше, существуют и другие методики оценивания систем диаризации, эффективность которых исследуется в настоящее время.

**Заключение.** Рассмотренные методы и системы диаризации дикторов различаются по скорости работы, необходимости предварительного обучения систем, точности сегментации аудиосигнала. Большинство разрабатываемых систем используют признаки MFCC для параметрического представления звукового сигнала; применение дополнительной информации (не только акустической) и распределенных микрофонов позволяет учесть индивидуальные особенности речи дикторов и улучшить точность работы систем диаризации.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при поддержке Минобрнауки РФ (федеральная целевая программа „Исследования и разработки“, госконтракт № 07.514.11.4139) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-01265-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The US NIST 2009, Rich Transcription Evaluation [Электронный ресурс]: <<http://www.itl.nist.gov/iad/894.01/tests/rt/2009>>.
2. Tranter S., Reynolds D. An overview of automatic speaker diarization systems // IEEE Trans. ASLP. 2006. Vol. 14, N 5. P. 1557—1565.
3. Будков В. Ю., Прищепина М. В., Ронжин А. Л., Марков К. Многоканальная система анализа речевой активности участников совещания // Третий междисциплинарный семинар „Анализ разговорной русской речи“. Тр. СПИИРАН. 2009. С. 57—62.
4. Pfau T., Ellis D., Stolcke D. Multispeaker speech activity detection for the ICSI meeting recorder // Proc. IEEE ASRU Workshop. Madonna di Campiglio, Italy, 2001. P. 107—110.

5. Dines J., Vepa J., Hain T. The segmentation of multi-channel meeting recordings for automatic speech recognition // Proc. Interspeech-2006, Pittsburgh, PA. 2006. P. 1213—1216.
6. Flego F., Zieger C., Omologo M. Adaptive weighting of microphone arrays for distant-talking F0 and voiced/unvoiced estimation // Proc. Interspeech-2007, Antwerpen, Belgium. 2007. P. 2961—2964.
7. Qiao Li, Qing Fan, Yunpeng Xiao, Weiping Ye. A comparable study on PNCC in speaker diarization for meetings // Proc. of the 1st ACIS Intern. Symp. on Cryptography and Network Security, Data Mining and Knowledge Discovery, E-Commerce & Its Applications and Embedded Systems (CDEE 2010), Yanshan Univ., China. 2010. P. 157—160.
8. Zhou Yu, Suo Hongbin, Wang Junjie, Yan Yonghong. An improved speaker diarization system for multiple distance microphone meetings // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA 2012), Zhangjiajie, Hunan. 2012. P. 80—83.
9. Ронжин А. Л., Будков В. Ю. Технологии поддержки гибридных е-совещаний на основе методов аудио-визуальной обработки // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2011. № 4. С. 31—35.
10. Valente F., Vijayasenan D., Motlicek P. Speaker diarization of meetings based on speaker role n-gram models // Proc. IEEE ASRU Workshop. Madonna di Campiglio, Italy, 2011. P. 4416—4419.

#### Сведения об авторах

- Андрей Леонидович Ронжин** — д-р техн. наук, доцент; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; E-mail: ronzhin@iias.spb.su
- Виктор Юрьевич Будков** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; E-mail: budkov@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

УДК 004.896

М. В. ПРИЩЕПА, К. Ю. БАРАНОВ

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА МОБИЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО РОБОТА

Проанализированы особенности разработки интерфейсов человеко-машинного взаимодействия на примере пользовательского интерфейса мобильного информационного робота, предоставляющего услуги справочного характера. Описаны режимы работы робота.

**Ключевые слова:** диалоговые системы, мобильные информационные роботы, многомодальные интерфейсы.

**Введение.** Разработка пользовательских интерфейсов человеко-машинного взаимодействия является актуальным направлением исследований в современном мире. Наиболее перспективным считается создание речевых и многомодальных интерфейсов как наиболее естественных для человека [1, 2]. В то же время разработка подобных интерфейсов связана с большим числом проблем, одной из которых является выбор между использованием записанного живого голоса и синтезированного для воспроизведения информации при взаимодействии с пользователем. Исследованиями подтверждено, что многие люди предпочитают слышать живые голоса, а не синтезированные [3]. Поэтому рекомендуется использовать именно их, а при необходимости — переключаться на синтезированную речь, заранее предупреждая об этом пользователя. Другой немаловажной проблемой является учет особенностей человеческого восприятия информации, которые накладывают определенные ограничения при проектировании интерфейсов.

В настоящей статье приведено описание перечисленных проблем и предложены их решения, а также представлены стратегии взаимодействия с пользователями на примере разработанного в СПИИРАН мобильного информационного робота и рассмотрены режимы работы робота при использовании его в качестве информационно-справочной системы.

**Когнитивные особенности человеческого восприятия.** При разработке речевого интерфейса следует учитывать три основные когнитивные составляющие человеческого восприятия (рис. 1).



Рис. 1

1. *Нагрузка на память.* Этот фактор накладывает достаточно жесткие ограничения на количество сообщаемой пользователю информации. Согласно исследованиям кратковременная память человека ограничена запоминанием в среднем 4—7 элементов [4]. Поэтому для повышения комфортности взаимодействия не рекомендуется в голосовом интерфейсе использовать более 5 пунктов [3].

2. *Удержание внимания.* Учет этого фактора актуален на этапе предоставления информации пользователю. Необходимо поток информации делить на фрагменты (если это возможно) и озвучивать только существенные данные. Следует также учитывать, что в процессе приема информации пользователь может отвлечься, поэтому для привлечения его внимания допускается использовать слова „важно“, „внимание“ и т.д.

3. *Понятийная сложность.* Уровень подготовки пользователей может быть разным, поэтому при проектировании диалоговых систем недопустимо использовать специальные термины и определения. Кроме того, действия системы и определения должны быть унифицированы, т.е. термин в разных пунктах меню интерфейса должен иметь одинаковое значение, а схожие действия должны выполняться по одной схеме во всех случаях. Необходимо также наличие универсальных команд навигации, доступных из любого пункта интерфейса (например, назад, помощь, повторить), с подробным их описанием и примерами применения.

**Особенности построения структуры речевого интерфейса.** Взаимодействие с пользователями всегда начинается с приветствия, от организации которого во многом зависит успешность диалога. Рекомендуемая длительность приветствия не должна превышать 15—20 с [5]. В приветствии необходимо сообщить основные правила работы с системой, при этом инструкции должны быть короткими и точными; кроме того, нужно сообщить пользователю, как он может при необходимости получить помощь в работе с системой. Заключительным этапом приветствия является предложение пользователю подать свой запрос.

Выбор нужной функции или темы — один из первых шагов диалога, обычно совмещаемый с приветствием (или следующий после него). Выбор темы можно реализовать путем предоставления пользователю списка всех возможных вариантов услуг и функций или можно предложить ему подать запрос в свободной форме. Однако второй способ может смутить неподготовленного пользователя, и, кроме того, он более сложен при реализации. Поэтому предоставление пользователю списка является предпочтительным. При этом необходимо учитывать, что меню интерфейса должно содержать не более пяти пунктов, если же количество функций достаточно велико, то целесообразно организовать иерархическую структуру меню интерфейса. Кроме того, поскольку для человеческой памяти характерен так называемый „закон края“ [6], т.е. лучше всего запоминается информация, представленная в начале и в конце диалога, то рекомендуется наиболее популярные и полезные сведения размещать в первых пунктах, а данные, которые человек должен запомнить (например, команды управления), — в конце сообщения. Среди голосовых сообщений системы можно выделить 5 основных типов (рис. 2).

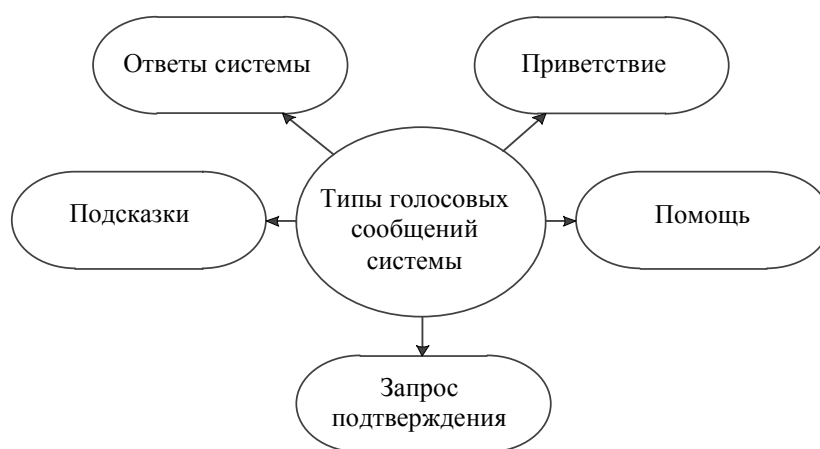


Рис. 2

В упрощенном виде диалог с пользователем состоит из вопроса, предлагаемого системой, ответа пользователя и эхо-ответа системы. При составлении голосовых запросов системы рекомендуется придерживаться нескольких правил, представленных в таблице.

Правило	Пример
Информацию, которую пользователь должен запомнить, следует помещать в конец фразы	Здравствуйте, Вы можете получить информацию о товарах и услугах. Информацию о функциях системы Вы можете получить в разделе „помощь“
Наличие примеров, содержащих ответы, позволит пользователю быстрее освоить работу с системой и сократит количество совершаемых им ошибок	Какой магазин Вас интересует? Например: „мне нужен магазин обуви“
Вопросы должны быть составлены таким образом, чтобы ответы пользователя содержали слова в основных грамматических формах	Назовите группу товара, которая Вас интересует. Например: „одежда для детей“

В ходе диалога пользователю может понадобиться справка по использованию каких-либо функций системы. Поэтому любая диалоговая система должна содержать раздел „помощь“, в котором представлена развернутая и подробная информация о функциях и услугах системы с примерами их использования; кроме того, функция „помощь“ должна быть доступна на любом этапе взаимодействия с пользователем.

Этап завершения диалога предполагает обработку запроса, введенного пользователем, и выработку ответного действия системы. На этом этапе пользователь должен иметь возможность проверить и при необходимости скорректировать свой запрос. Поэтому система должна



озвучить введенную пользователем информацию, запросить подтверждение правильности введенных данных, запустить функцию корректировки и в конце, после внесения необходимых исправлений, сообщить пользователю о том, что его запрос принят в обработку или выполняется.

Если результатом выполнения задания является вывод большого объема аудиоинформации, то рекомендуется осуществлять ее разделение на категории и блоки; также дополнительная (расширенная) информация должна предоставляться только по требованию пользователя [7].

**Режимы работы мобильного информационного робота.** Рассмотрим сценарии человекомашинного взаимодействия на примере информационного робота [8]. Робот представляет собой информационную стойку, две рабочие стороны которой имеют одинаковый набор и расположение сенсоров. Для поиска пользователей и записи их видеоданных используются две видекамеры, установленные в информационной стойке и расположенные на высоте лица человека среднего роста. Определение положения тела человека и слежение за его лицом реализованы с помощью алгоритма, регистрирующего перемещение естественных маркер-точек лица (центр верхней губы, кончик носа, переносица, зрачок правого глаза и зрачок левого глаза), что позволяет увеличить робастность определения координат головы при быстрых движениях и случайных видеосумах [9, 10]. Для основных процедур регистрации и обработки видеосигнала применяется библиотека OpenCV. Для обработки аудиоинформации на передних панелях робота установлены T-образные массивы микрофонов, используемых для работы системы распознавания речи, аудиолокализации источника звука и накопления аудиоданных пользователя [11]. Алгоритм аудиолокализации основывается на методе взаимной корреляции сигналов (General Cross Correlation — GCC) с применением весовой функции РНАТ (Phase Transform) [12].

Базовый сценарий работы робота в режиме диалога, учитывающий действия пользователя, представлен на рис. 3, где отражены наиболее типичные случаи взаимодействия.

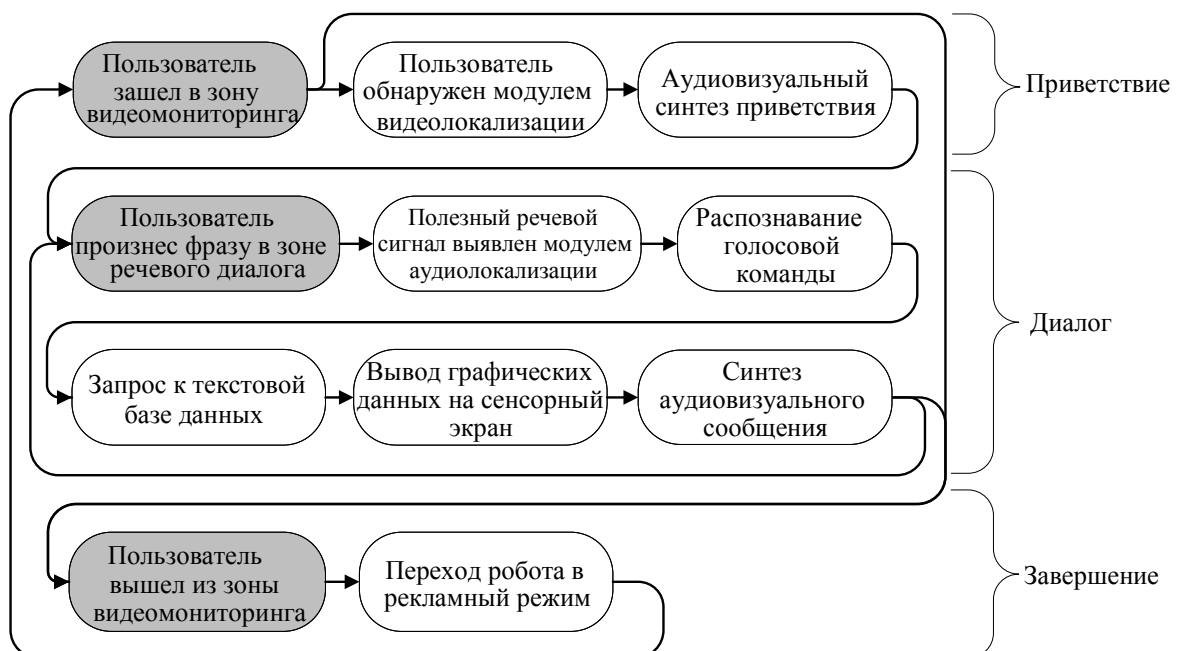


Рис. 3

В частности, цикл взаимодействия может быть представлен следующим образом: пользователь произносит голосовую команду в зоне речевого диалога, его аудиосигнал регистрируется, распознается, и осуществляется поиск необходимой информации в базе данных, а результат выводится на экран робота и синтезируется посредством „говорящей головы“.

В ходе одного сеанса взаимодействия пользователь может сделать несколько голосовых запросов к устройству, в этом случае этапы аудиообработки и вывода информации на экран повторяются соответствующее число раз.

Рассмотрим два наиболее перспективных способа использования информационного мобильного робота: 1) в торговом центре (ТЦ); 2) в организации.

1. В первом случае робот, находящийся в постоянно изменяющейся среде в сложных условиях, вследствие многолюдности в торговых центрах, должен производить мониторинг окружающей среды и проверять наличие посетителей в зоне видеомониторинга. Высокий уровень аудишумов в торговом центре, вероятно, снизит эффективность работы систем аудиолокализации и автоматического распознавания речи, поэтому предпочтение будет отдаваться графическому интерфейсу, а слежение за пользователями будет осуществляться системой видеомониторинга. При этом необходимо решить проблему выбора пользователя в случае, если робот обнаружил в зоне взаимодействия нескольких посетителей. Если посетитель найден, следует начать взаимодействие.

Основными вариантами функционирования робота в ТЦ являются:

- оказание справочных услуг;
- вывод рекламы магазинов или товаров;
- служебный режим.

Оказание справочных услуг подразумевает вывод интересующей пользователя информации на экраны робота или озвучивание данных с помощью системы синтеза речи [13]. В качестве справки могут быть показаны текущее местоположение пользователя и робота, а также маршрут до объекта, который интересует пользователя; кроме того, может быть выполнен поиск товаров и услуг по базе данных торгового центра, поиск магазина по названию или принадлежности к категории продаваемых в нем товаров. К справочным услугам относится также возможность производить в режиме онлайн заказ товара в магазине и осуществлять непосредственную связь с представителем магазина.

В режиме рекламирования на экран робота выводится информация о текущих акциях в магазинах, о товарах и услугах.

В случае низкого заряда аккумуляторов робот переходит в служебный режим, предварительно предупредив об этом пользователя.

2. Окружающая обстановка на территории государственной или коммерческой организации отличается от обстановки в торговом центре: меньше уровень шума и число пользователей. Тем не менее типы решаемых роботом задач остаются прежними: ему необходимо перемещаться по заданной территории и предоставлять услуги справочного характера, например: карту здания, информацию о расположении отделов, контактные данные сотрудников. Также с использованием каналов связи робота должна быть реализована возможность связи с отделом, запрашиваемым пользователем, кроме того, робот должен иметь возможность по запросу пользователя проводить его до места назначения. Благодаря относительно небольшому количеству сотрудников в организации робот в случае обнаружения препятствия, не отмеченного на карте, может сделать предположение о наличии перед ним потенциального пользователя и сразу начать приветствие без предварительного поиска лица. Это позволит сократить начальную фазу диалога и повысить естественность коммуникации. Тем не менее в процессе озвучивания приветствия поиск лица осуществляется и при отрицательном результате поиска робот вместо диалога продолжает свой маршрут.

Проведенный анализ требований к информационному мобильному роботу, а также анализ особенностей его эксплуатации в торговом центре и в государственной или коммерческой организации показал, что оптимизацию способов ввода/вывода информации и стратегии диалогов необходимо осуществлять в зависимости от окружающей обстановки и числа потенциальных пользователей.

**Заключение.** Разработка пользовательских интерфейсов требует решения ряда вопросов, касающихся психологических аспектов коммуникации и способов автоматического анализа поведения человека. Представленный в статье информационный сервисный робот оснащен сенсорами различного типа действия, что позволяет определить появление пользователя и отличить его от препятствий на пути движения робота, а его диалоговая модель взаимодействия с пользователями разработана с учетом анализа психологических аспектов человеческого восприятия информации.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при поддержке Минобрнауки РФ (федеральная целевая программа „Кадры“, госконтракт № П876) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-01265-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oviatt S. L.* Ten myths of multimodal interaction // *Communications of the ACM*. 1999. Vol. 42 (11), P. 74—81.
2. *Карнов А. А., Ронжин А. Л.* Многомодальные интерфейсы в автоматизированных системах управления // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2005. Т. 48, № 7. С. 9—14.
3. *Билик Р. В., Мясоедова З. П., Петухова Н. В., Фархадов М. П., Троценко А. Ю.* Принципы построения интерактивных систем самообслуживания с речевыми технологиями. М.: МАКС Пресс, 2008. 142 с.
4. *Miller G. A.* The magical number seven, plus or minus two // *The Psychological Rev.* 1956. Vol. 63. P. 81—97.
5. *Билик Р. В., Жожикашвили В. А., Петухова Н. В., Фархадов М. П.* Анализ речевого интерфейса в интерактивных сервисных системах // *Автоматика и телемеханика*. 2009. № 3. С. 97—113.
6. *Wickelgren W. A.* The long and the short of memory // *D. Deutsch, J. A. Deutsch*: Eds. Short-term memory. N.Y., 1975.
7. *Powers A., Kiesle S.* The advisor robot: tracing people's mental model from a robot's physical attributes // *Proc. of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conf. on Human-Robot Interaction*, Salt Lake City, UT. 2006. P. 218—225.
8. *Budkov V., Prischepa M., Ronzhin A.* Dialog model development of a mobile information and reference robot // *Pattern Recognition and Image Analysis*, Pleiades Publishing. 2011. Vol. 21, N 3. P. 458—461.
9. *Aissaoui A., Auguste R., Yahiaoui T., Martinet J., Djeraba C.* Fast stereo matching method based on optimized correlation algorithm for face depth estimation // *Proc. of the VISAPP 2012 — Intern. Conf. on Computer Vision Theory and Applications*, Rome, Italy. 2012. P. 377—380.
10. *Jungmann A., Schierbaum T., Kleinjohann B.* Image segmentation for object detection on a deeply embedded miniature robot // *Proc. of the VISAPP 2012 — Intern. Conf. on Computer Vision Theory and Applications*, Rome, Italy. 2012. P. 441—444.
11. *Ронжин А. Л., Карнов А. А.* Сравнение методов локализации пользователя многомодальной системы по его речи // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2008. Т. 51, № 11. С. 41—47.
12. *Laskowski K., Jin Q., Schultz T.* Crosscorrelation based multispeaker speech activity detection // *Proc. of the Interspeech-2004*, Jeju Island, Korea. 2004. P. 973—976.
13. *Карнов А. А., Цирульник Л. Л., Железны М.* Разработка компьютерной системы „говорящая голова“ для аудиовизуального синтеза русской речи по тексту // *Информационные технологии*. 2010. Т. 9, № 8. С. 13—18.

#### Сведения об авторах

- Мария Викторовна Прищепа** — СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; мл. науч. сотрудник; E-mail: prischepa@iiias.spb.su
- Константин Юрьевич Баранов** — СПИИРАН, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов; программист; E-mail: baranov@iiias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

---

---

# ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

---

---

УДК 004.056

В. А. ДЕСНИЦКИЙ, И. В. КОТЕНКО

## МОДЕЛЬ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННЫХ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ

Предложена модель конфигурирования безопасных и энергоэффективных встроенных систем, предназначенная для поиска наиболее эффективных комбинаций компонентов механизма защиты на основе решения оптимизационной задачи.

*Ключевые слова:* встроенная система, защита информации, проектирование защищенных встроенных систем, конфигурирование.

**Введение.** Одна из актуальных задач в области информационной безопасности — проектирование защищенных информационно-телекоммуникационных систем со встроенными модулями (устройствами). Особенности таких систем связаны, во-первых, с автономностью входящих в их состав устройств и, во-вторых, с ограничениями, накладываемыми на ресурсы устройств, что приводит к их низкой производительности [1, 2].

Проектирование встроенных систем традиционно осуществляется с использованием так называемого компонентного подхода, при котором система защиты строится путем комбинирования отдельных компонентов — алгоритмов и решений, реализующих необходимые функциональные свойства системы защиты. Вместе с тем комбинирование компонентов системы защиты с учетом лишь ее функциональных свойств часто оказывается неэффективным ввиду упомянутых существенных ресурсных ограничений и, как следствие, невозможности реализации полученных решений на практике.

Предлагаемая в настоящей статье конфигурационная модель предназначена для поиска наиболее эффективных комбинаций компонентов механизма защиты на основе решения оптимизационной задачи с учетом нефункциональных свойств встроенной системы и ресурсных ограничений.

Вопросам безопасности встроенных систем посвящено множество публикаций. В частности, в работах [3, 4] перечислены ключевые проблемы в этой области: идентификация пользователей, безопасное хранение данных внутри устройства, устойчивость установленного программного обеспечения к модификациям, безопасный доступ к сети, безопасные сетевые соединения и др. При этом современные механизмы защиты встроенных систем предназначены, в первую очередь, для предоставления защиты против определенного вида угроз [5—7]: так, в работах [4, 8, 9] рассматриваются различные классификации видов угроз для встроенных модулей и типов нарушителей исходя из особенностей и возможностей нарушителя и его окружения [10].

В качестве пути достижения компромисса между защищенностью устройства и его ресурсопотреблением авторы работы [11] рассматривают использование „реконфигурируемых примитивов безопасности“ на основе динамической адаптации архитектуры устройства в зависимости от его состояния и окружения. Предлагаемая адаптация базируется на возможности динамического переключения между несколькими механизмами защиты, встроенными в модуль, и на периодическом обновлении элементов этих механизмов.

В настоящей статье, в отличие от работы [11], предлагается подход к конфигурированию, применяемый непосредственно при проектировании устройства, при этом поиск эффективных относительно производительности устройства решений основывается на выборе компонентов системы защиты исходя из нефункциональных ресурсных требований к устройству и заданных критериев оптимальности.

**Задача конфигурирования.** Под конфигурацией системы защиты понимается множество ее компонентов, использование которых, во-первых, позволяет реализовать все необходимые функциональные свойства системы защиты, во-вторых, удовлетворить ограничения на объемы ресурсов, выделяемых для выполнения защитных функций, и, в-третьих, удовлетворить ограничения на программно-аппаратную совместимость устройства.

Если конфигурация удовлетворяет всем трем условиям, она называется допустимой. Оптимальность понимается в соответствии с заданным критерием, определяемым разработчиком системы в процессе ее проектирования. Процесс конфигурирования включает решение следующих задач на стадии проектирования встроенных модулей: поиск допустимых конфигураций; поиск оптимальных конфигураций; проверка допустимости и оптимальности конфигурации.

Решаемая оптимизационная задача является в общем случае многокритериальной экстремальной задачей с заданным набором ограничений. Ее математическая постановка формулируется с использованием теоретико-множественного представления:

$$\begin{aligned} & goal\_function(non\_functional\_properties(configuration)) \rightarrow min, \\ & \quad constr(functional\_properties(configuration)), \\ & \quad constr(non\_functional\_properties(configuration)), \\ & \quad constr(platf\_compat\_properties(configuration)) . \end{aligned}$$

Формулировка задачи содержит задание целевой функции (*goal\_function*) на основе количественных значений нефункциональных свойств конфигурации и определение ограничений (*constr*) оптимизационной задачи; при этом рассматриваются как ограничения, накладываемые на функциональные и нефункциональные свойства системы защиты (*functional\_properties*, *non\_functional\_properties*), так и ограничения на программно-аппаратную совместимость (*platf\_compat\_properties*). Цель оптимизационной задачи — в соответствии с заданной целевой функцией найти экстремальное значение, представляющее оптимальную конфигурацию.

**Моделирование нефункциональных свойств.** Построение конфигурационной модели базируется на определениях и методологическом аппарате, предложенных в рамках методологии моделирования MARTE (Modeling and Analysis of Real-Time and Embedded Systems — моделирование и анализ систем реального времени и встроенных систем) [12]. В соответствии с этой методологией в качестве разновидности нефункциональных свойств системы защиты выделяются количественные (quantitative) свойства, которые являются измеримыми.

Количественное свойство, во-первых, характеризуется набором значений (Sample Realizations), которые определяются (измеряются) во время работы устройства, причем измерения могут производиться в рамках экспериментов на реальной системе или на основе программного моделирования. В частности, для циклически детерминированных систем такие значения могут быть получены однократно и „экстраполированы“ на последующие временные циклы.

Во-вторых, количественно нефункциональное свойство характеризуется так называемой функцией измерения (Measure), позволяющей сопоставить набор полученных значений с некоторой числовой величиной. К функциям измерения, например, можно отнести некоторые математические функции: max (максимизация множества), min (минимизация), mean (функция усреднения).

Для количественного определения нефункциональных свойств компонент системы защиты может быть запущен в режиме отладки с использованием средств профилирования, либо процедура оценки свойства может быть непосредственно встроена в приложение. В последнем случае необходимо учитывать побочный эффект данной процедуры и, возможно, корректировать получаемые значения.

В соответствии с методологией MARTE выделяются следующие виды аппаратных ресурсов и соответствующих им нефункциональных свойств:

— вычислительные ресурсы (HW\_Computing package); основная характеристика ресурса — `opFrequencies`, определяющая интервал значений рабочих частот процессора; ресурс характеризуется также величинами MIPS, FLOPS, с помощью которых оценивается количество операций, выполняемых в единицу времени;

— ресурс оперативной памяти (HW\_ProcessingMemory package); характеристика — объем памяти и время отклика при доступе к памяти;

— ресурс хранения (HW\_StorageManager package); характеристика — объем хранилища;

— ресурс коммуникаций (HW\_Communication package); характеристика — пропускная способность канала;

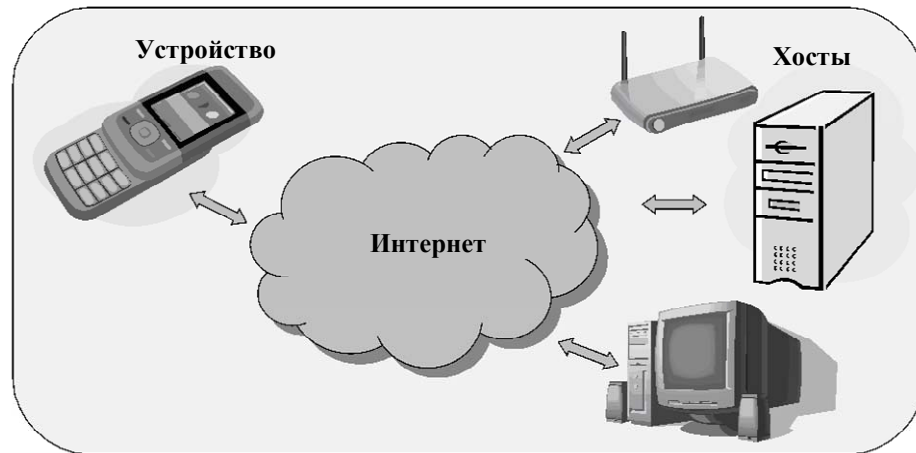
— энергоресурсы (HP\_Power package); энергоресурсы расходуются, собственно, на поддержку работы компонентов системы защиты, а также на тепловую энергию; характеристики — мощность источника питания, необходимая для работы устройства (HW\_PowerSupply package), и мощность аккумулятора, определяющая продолжительность автономной работы устройства (HW\_Battery package).

**Программная реализация.** Авторами разработан программный прототип, реализующий процесс конфигурирования встроенных систем и демонстрирующий принцип конфигурирования. Цель средства конфигурирования — помочь разработчику устройства на стадии его проектирования в принятии решений о выборе наиболее эффективных конфигураций. Разработчику предоставляются: информация о функциональных и нефункциональных свойствах компонентов системы защиты, о свойствах программно-аппаратной совместимости и критериях оптимизации; спецификация защищаемого устройства. В программе также реализованы функции управления процессом конфигурирования. В соответствии с заданными ограничениями и критерием оптимальности, а также множеством компонентов системы защиты программное средство позволяет выявить оптимальные конфигурации. Прототип включает также функцию проверки допустимости и оптимальности заданной конфигурации.

**Демонстрационный пример.** Продемонстрируем, как принципы конфигурирования могут применяться на практике в процессе проектирования устройств. Демонстрационный пример содержит программные модели мобильного приложения, выполняемого на встроенном модуле, и окружения, в котором модуль функционирует. В частности, в примере демонстрируется ход выполнения методик количественного определения нефункциональных свойств для компонентов и ресурсных ограничений устройства.

Рассматриваемое в примере устройство — смартфон на базе мобильной операционной системы Android (при проведении экспериментов использовалось устройство „HTC Wildfire S“, операционная система Android 3.2), а программное приложение — коммуникационное приложение, функционирующее в сети Интернет („мессенджер“). Задача демонстрационного примера — защита программы от несанкционированных модификаций (см. рисунок).

Ограничимся здесь рассмотрением лишь двух функциональных свойств системы защиты: первое свойство формулируется как „реализация функции постоянного мониторинга внутреннего состояния выполняемой программы посредством принципа удаленной аттестации“; второе свойство — „конфиденциальность критически важных бизнес-данных приложения, хранимых в постоянной памяти устройства“.



В ходе моделирования осуществляется реализация программного приложения, компонентов системы защиты, интегрируемых в него, а также запускаемых в рамках экспериментов функций измерения количественных значений нефункциональных свойств.

Примем следующее допущение. Так как количественные значения нефункциональных свойств измеряются индивидуально для каждого компонента, считаем, что суммарные значения свойств для конфигураций являются суммой соответствующих значений для каждого отдельного компонента. Отметим, что на практике следует учитывать взаимовлияние компонентов системы защиты применительно к расходованию ресурсов устройства. Например, компонент, реализующий удаленную аттестацию, может контролировать целостность не только бизнес-функций программы, но и других компонентов системы защиты.

Рамки моделирования были ограничены рассмотрением трех видов ресурсов устройства как наиболее простых в плане реализации и проведения экспериментов: ресурса оперативной памяти; ресурса хранения; ресурса коммуникаций. Соответственно рассматривались три нефункциональных свойства компонентов: максимальный объем оперативной памяти, расходуемой компонентом на протяжении его работы; минимальный объем постоянной памяти, требуемый для хранения и работы компонента; минимальная пропускная способность коммуникационного канала, необходимая для работы компонента. Таким образом, были заданы и три нефункциональных ограничения для работы устройства: объем оперативной памяти, выделяемый на работу компонентов; объем постоянной памяти, расходуемый на работу компонентов; пропускная способность коммуникационного канала, которую устройство способно предоставить для поддержки работы компонентов.

В ходе экспериментов осуществлялось моделирование двух видов компонентов системы защиты со встроенными в нее процедурами измерения показателей ресурсопотребления. Согласно условиям экспериментов моделируемое приложение содержит некоторое число структур данных, которые рассматриваются в качестве критически важных в контексте защиты от неавторизованных модификаций. Для простоты примем число структур данных одинакового размера — 400 экземпляров байтовых массивов, по 100 байт каждый. Для компонента, реализующего удаленную аттестацию, полагаем, что каждая структура имеет несколько допустимых количественных значений, которые считаются корректными. Если структура имеет отличное от них значение, то это свидетельствует о нарушениях в программе.

Для каждой такой структуры вычисляется хэш-значение (при помощи хэш-функций MD5, SHA), которое отсылается на сторону аттестующего сервера и там подвергается верификации. Значение контрольного интервала задается равным 1 с (т.е. каждую секунду набор подписей — хэш-значений для каждой структуры — должен отсылаться удаленной аттестующей сущности).

Значения расхода ресурсов для каждого компонента приведены в табл. 1 (ресурсы компонентов, реализующих удаленную аттестацию) и в табл. 2 (ресурсы компонентов, реализующих симметричное шифрование критических данных).

Таблица 1

Удаленная аттестация	Расход ресурса		
	памяти, кбайт	хранения, кбайт	коммуникаций, кбит/с
С использованием хэш-функции MD5/128	287	4	51,2
С использованием хэш-функции SHA-256/256	359	4	102,40

Таблица 2

Симметричное шифрование	Расход ресурса		
	памяти, кбайт	хранения, кбайт	коммуникаций, кбит/с
На основе AES/128	523	4	—
На основе DES/56	552	4	—

Использование определенных экспериментально количественных значений нефункциональных свойств позволяет снабдить каждый из компонентов системы защиты набором характеристик его ресурсопотребления. В результате, выбирая наиболее подходящий критерий оптимальности, разработчик определяет оптимальные комбинации компонентов системы защиты (конфигурации являются оптимальными по построению).

При возрастании количества функциональных требований к системе защиты, а также при увеличении числа имеющихся компонентов процедура ручного перебора всех возможных компонентов разработчиком оказывается неэффективной, в частности, вследствие ее экспоненциальной сложности.

Осуществление автоматизированного процесса конфигурирования с использованием разработанной модели позволяет находить оптимальные конфигурации за приемлемое время. В частности, как показали эксперименты, процесс конфигурирования на множестве более чем 100 вариантов компонентов на персональном компьютере выполняется менее чем за 1 с, и даже при увеличении количества компонентов до 1000 и более (если теоретически допустить такую ситуацию) временные затраты окажутся вполне приемлемыми.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №10-01-00826-а), программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.2) и государственного контракта 11.519.11.4008, а также при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза “SecFutur” и MASSIF.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grand J.* Practical secure hardware design for embedded systems // Proc. of the Embedded Systems Conf., San Francisco, CA, CD-ROM, CMP Media, 2004 [Электронный ресурс]: <[www.grandideastudio.com/wp-content/uploads/secure\\_embed\\_paper.pdf](http://www.grandideastudio.com/wp-content/uploads/secure_embed_paper.pdf)>.
2. *Koopman P.* Embedded system security // IEEE Computer. 2004. Vol. 7, N 37. P. 95—97.
3. *Kocher P., Lee R., McGraw G., Ravi S.* Security as a new dimension in embedded system design // Proc. of the 41st Design Automation Conf. DAC '04. New York, NY, 2004. P. 753—760.



4. Ruiz J. F., Harjani R., Maña A., Desnitsky V., Kotenko I., Chechulin A. A methodology for the analysis and modeling of security threats and attacks for systems of embedded components // Proc. of the 20th Euromicro Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Network-Based Computing (PDP 2012). Munich, Germany, 15—17 Febr. 2012. P. 261—268 [Электронный ресурс]: <doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/PDP.2012.36>.
5. Десницкий В. А., Чечулин А. А. Модели процесса построения безопасных встроенных систем // Системы высокой доступности. 2011. № 2. С. 97—101.
6. Котенко И. В., Десницкий В. А., Чечулин А. А. Исследование технологии проектирования безопасных встроенных систем в проекте Европейского сообщества SecFutur // Защита информации. Инсайд. 2011. № 3. С. 68—75.
7. Desnitsky V., Kotenko I., Chechulin A. An abstract model for embedded systems and intruders // Proc. of the Work in Progress Session Held in Connection with the 19th Euromicro Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP 2011). Ayia Napa, Cyprus, Febr. 2011. Wilmington, NC: SEA-Publications, 2011. P. 25—26.
8. Abraham D. G., Dolan G. M., Double G. P., Stevens J. V. Transaction security system // IBM Systems J. 1991. N 30, Iss. 4. P. 598—598.
9. Kommerling O., Kuhn M.G. Design principles for tamper-resistant smartcard processors // Proc. of the USENIX Workshop on Smartcard Technology. CA, 1999. P. 9—20.
10. Десницкий В. А., Котенко И. В., Чечулин А. А. Конфигурирование защищенных систем со встроенными и мобильными устройствами // Вопросы защиты информации. 2012. № 2.
11. Gogniat G., Wolf T., Burlison W. Reconfigurable security primitive for embedded systems // Proc. of System-on-Chip Intern. Symp., 2005. P. 23—28 [Электронный ресурс]: <http://journals.ohiolink.edu/ejc/article.cgi?issn=19367406&issue=v02i0001&article=1\_geitsirsd>.
12. MARTE. The UML Profile for MARTE: Modeling and Analysis of Real-Time and Embedded Systems. Object Management Group, Version 1.1 [Электронный ресурс]: <http://www.omgarte.org>.

**Сведения об авторах**

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

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

Д. В. КОМАШИНСКИЙ, И. В. КОТЕНКО

## МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Представлен метод извлечения из набора данных статических структурных признаков, развивающий ранее предложенный авторами подход к обнаружению вредоносных документов на основе применения методов машинного обучения. Метод базируется на использовании структурных особенностей элементов вредоносных документов и связей между ними.

*Ключевые слова:* извлечение признаков, вредоносное программное обеспечение, классификация.

**Введение.** Одна из важнейших задач компьютерной безопасности — обнаружение вредоносных программ. За последнее десятилетие темп появления нового, ранее неизвестного вредоносного программного обеспечения (ВПО) существенно изменился. Так, в 2001 г. появлялось не более 8—10 новых экземпляров подобных программ в сутки [1], а осенью 2011 г. этот показатель составил порядка 40 000 экземпляров [2]. Необходимость анализа постоянно увеличивающегося потока данных привела к разработке дополнительных, эвристических подходов к обнаружению ВПО. Эта задача решается, в том числе, с помощью методов машинного обучения (Machine Learning — ML) и интеллектуального анализа данных (Data Mining — DM) [1, 3]. В настоящее время существуют промышленные программные системы, используемые поставщиками услуг по информационной безопасности для предварительной классификации потока входных данных и разделения их на категории [3].

Применение методов ML и DM имеет характерные особенности. Они определяются рядом вопросов, на которые исследователь должен ответить при планировании экспериментов. К таковым, в первую очередь, относятся следующие проблемы:

- определение исходного набора данных, используемого для подготовки обучающей и тестовой выборок;
- выбор методов обучения, формирующих конечную модель обнаружения;
- выбор процедур извлечения из набора данных признаков, определяющих пространство используемых атрибутов.

Вопрос выбора исходного набора данных решается за счет применения как открытых наборов, используемых в академических исследованиях [4], так и наборов, формируемых компаниями, которые занимаются проблемами информационной безопасности [3]. Вопрос применения того или иного метода обучения свойственен не только задаче обнаружения ВПО. Существует ряд работ (см., например, [5]), содержащих рекомендации по его решению, определяемые, как правило, типом решаемой задачи, характером используемых в процессе обучения данных и требованиями к ресурсопотреблению процедуры обучения модели. Таким образом, во многом успех задачи обнаружения ВПО определяется процедурой извлечения признаков (Feature Extraction — FS).

Одним из открытых вопросов в области обнаружения ВПО является своевременное выявление Web-ресурсов, на которых функционируют так называемые „пакеты эксплуатации уязвимостей“ (Exploit Kits). Подобные вредоносные программы при обращении пользовательского приложения по зараженной ссылке проверяют наличие на стороне клиента уязвимых приложений и перенаправляют его на новый, специально подготовленный полиморфный

файловый контейнер, обработка которого на атакуемой стороне приводит к „срабатыванию уязвимости“ и эксплуатации ее злоумышленником.

Авторами настоящей статьи ранее был предложен подход [6] к обнаружению подобных вредоносных файлов формата PDF (Portable Document Format) [7]. Суть данного метода заключается в использовании ряда статических признаков, свойственных, согласно отчетам исследовательского сообщества [8, 9], вредоносным документам, для формирования многомерного пространства атрибутов, характеризующих любой документ этого формата. Предложенный подход позволяет оценить применимость методов DM для задачи обнаружения вредоносных документов, эффективность отдельных методов обучения, а также эффективность применения групп признаков. Было показано, что совместное использование некоторых групп статических признаков и методов обучения позволяет создать модели обнаружения с показателями точности выше 90 %. Вместе с тем была отмечена необходимость дальнейшего исследования проблемы в контексте поиска дополнительных статических свойств, присущих вредоносным документам [6].

В настоящей статье рассматривается метод, развивающий предложенный подход за счет извлечения дополнительных статических признаков из файлов формата PDF. Метод основан на использовании структурных особенностей элементов документа и связей между ними.

В методологии обнаружения ВПО, которой посвящено множество публикаций, различают две основные группы используемых признаков — статическую и динамическую [10]. Статическая группа признаков включает в свой состав данные, извлекаемые из документов на основе анализа их содержимого и структуры. Динамические (также известные как поведенческие) признаки извлекаются из анализируемых документов с помощью процедуры их обработки интерпретирующей средой (исполнения) или моделью этой среды (эмуляции). В работах [10, 11] представлен анализ применимости для обнаружения ВПО байтовых цепочек (*n*-грамм). Структурные особенности различных форматов вредоносных файлов и их значимость обсуждаются в работах [10, 12]. Использование цепочек минимальных логических элементов файлов (например, опкодов машинных инструкций и их обобщений) рассматривается в работах [13,14], а пример анализа более крупных логических элементов опасных файлов (линейных блоков трансляции, внутренних процедур и их взаимосвязей с библиотечными процедурами) приведен в работах [14,15]. В частности, задачи сравнения графов взаимосвязей отдельных элементов вредоносных файлов обсуждаются в работе [15].

Предлагаемый в данной статье подход к извлечению признаков основан на типовых особенностях современных форматов документов, представляющих сложную иерархическую совокупность связанных элементов. Основным отличием рассматриваемого метода от существующих подходов к анализу структуры взаимосвязей документов является обнаружение отдельных пар элементов документа с последовательным формированием отдельного признака, характеризующего совокупностью свойств 1) главного элемента пары, 2) атрибута его связи с подчиненным элементом, 3) подчиненного элемента пары и длиной минимального маршрута от главного элемента пары до элемента графа, представляющего начальную структуру (так называемую „точку входа“) анализируемого документа.

**Формирование модели обнаружения ВПО.** Извлечение признаков из исходного набора данных является первым шагом общего процесса использования методов ML и DM для формирования модели обнаружения ВПО [16]. IDEF0-модель данного процесса представлена на рис. 1.

Процесс формирования модели содержит следующие шаги.

1. *Извлечение признаков*, формирующих базовый набор атрибутов, характеризующий общее пространство признаков, которые могут быть использованы при обучении модели. Как было показано ранее, именно этот шаг отвечает за извлечение из набора данных необходимой

для исследователя семантики атрибутов, определяющей идею общего подхода к обнаружению ВПО.

2. *Выделение значимых признаков*, обеспечивающее выбор из базового набора наиболее значимых атрибутов. Данный шаг позволяет уменьшить количество признаков, используемых для обучения модели, и обеспечивает необходимые для обучения приемлемые расходы вычислительных ресурсов.

3. *Обучение модели*, позволяющие сформировать модель обнаружения ВПО. Традиционно на данном шаге применяется один из выбранных исследователем методов классификации или кластеризации потока данных.

4. *Проверка (оценивание) модели*, обеспечивающая выходной контроль качественных параметров модели — точности обнаружения, времени работы и ресурсопотребления.

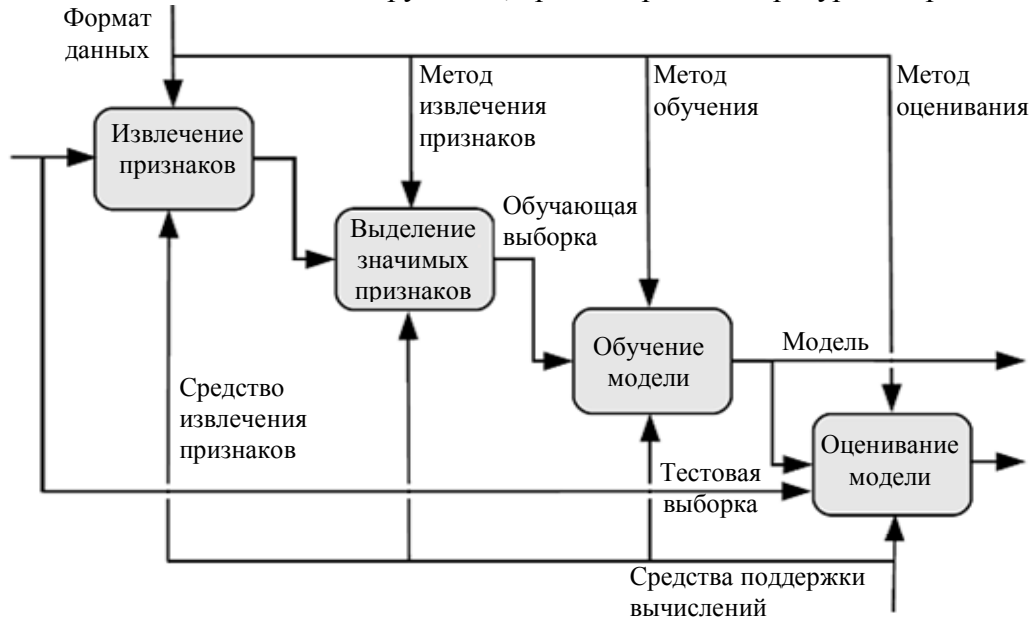


Рис. 1

**Метод извлечения признаков.** Общие особенности формата PDF представлены в работе [7]. В рамках рассматриваемого метода особый интерес представляют три внутренние группы сущностей, составляющих документ: это корневые элементы иерархии (стартовый объект и элементы таблиц взаимосвязей), косвенные объекты (*indirect objects*), хранящие основное содержание документа, и связи, характеризующие структурные отношения (роли) объектов. Пример структуры вредоносного документа представлен на рис. 2.

Точка входа в документ — стартовый объект (*Trailer*) — имеет ссылку на косвенный объект 1.0.obj с ролью *Root*. Данный объект имеет тип *Catalog* и ссылается на последующие в иерархии объекты, имеющие определенные роли (например, роль *Kids*, представляющая связь коллекции страниц документа в косвенном объекте 5.0.obj с косвенным объектом 8.0.obj представления отдельной страницы документа). В соответствии со спецификацией формата [7] косвенный объект также может иметь дополнительные внутренние свойства, определяющие его тип (общее свойство *Type*), структурные (например, свойство *Count* объекта 5.0.obj) и функциональные (свойство *S* объекта 10.0.obj) особенности.

Одной из структурных особенностей вредоносных документов является, как показано ниже, наличие объявленных ссылок на несуществующие косвенные объекты, представленные на рис. 2 в виде элементов иерархии, очерченных тонкими линиями.

Метод извлечения структурных признаков включает выполнение следующих шагов.

1. Построение структуры документа, представленной в виде ориентированного графа  $G=(V,E)$ , где множество  $V$  вершин определяется существующими ссылками на корневой и косвенные объекты, а множество  $E$  дуг определено множеством пар связанных вершин.

2. Каждый элемент множества  $E$  рассматривается в виде отдельного структурного признака, содержащего 1) свойства начальной вершины дуги, 2) тип ее связи с конечной вершиной и 3) свойства конечной вершины дуги.

3. При формировании конечного множества признаков каждый из элементов получает дополнительный атрибут, определяемый длиной минимального маршрута от начальной вершины соответствующего ему элемента множества  $V$  до вершины, характеризующей точку входа документа.

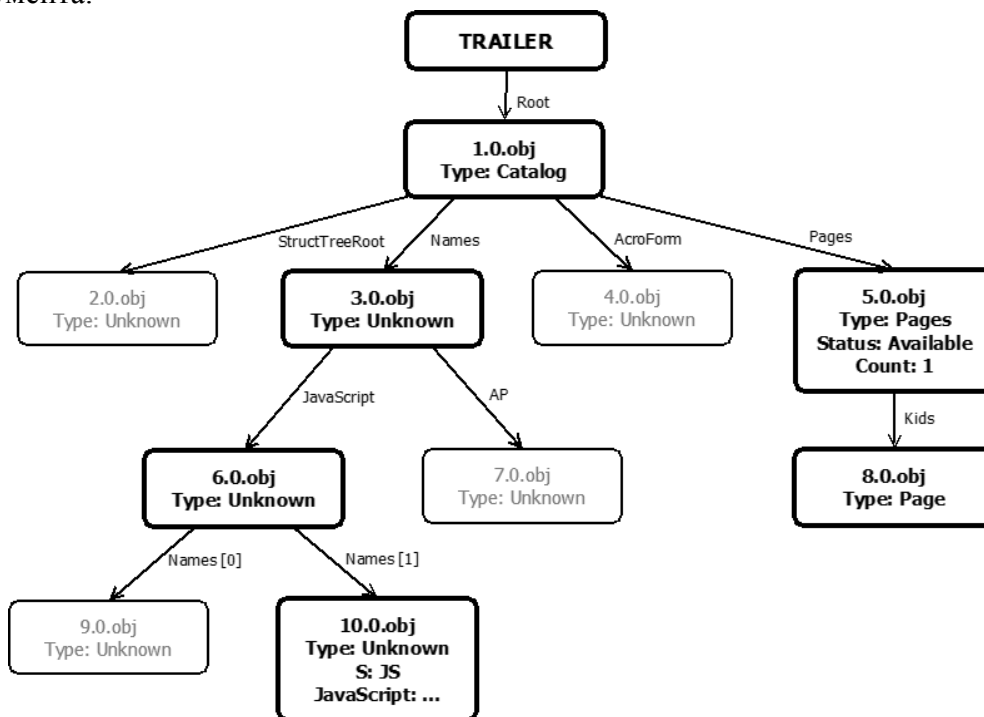


Рис. 2

Изложенный метод позволяет составить набор статических структурных признаков, наличие или отсутствие каждого из которых отображается булевой величиной в конечном характеризующем векторе каждого объекта обучающего набора. Первоначальная оценка эффективности метода была произведена на наборе данных, использованном авторами в работе [6]. В ходе экспериментов была разработана модель обнаружения вредоносных документов на основе метода классификации Decision Tree (дерево решений). Эксперименты проводились в соответствии с общей схемой выполнения работ [6] и поддерживались с помощью программных пакетов Open PDF Analysis Framework [17] и RapidMiner [18].

Точность классификации данных при использовании метода 10-кратной кросспроверки составила 94,9 %. Сопоставимый результат был получен в работе [6] при анализе применимости группы статических признаков, характеризующей используемые во вредоносных документах методы компрессии данных.

Результаты экспериментов позволили выявить ряд скрытых свойств вредоносных документов:

— значимость наличия ссылок на несуществующие в документе косвенные объекты и значимость изолированных цепочек взаимосвязанных объектов; наличие данных аномалий объясняется, по-видимому, спецификой программной реализации генераторов вредоносных документов: судя по полученным результатам, злоумышленники нацелены на создание вредоносных документов, имеющих существенные структурные отклонения, что препятствует их правильному разбору существующими средствами анализа;

— значительное количество устойчивых последовательностей признаков, имеющих отдельные переменные атрибуты косвенных взаимосвязанных объектов; обнаружение

современных вредоносных документов может быть осуществлено по признакам, не относящимся к структурным аномалиям или динамическому анализу вложений в документы; возможно, это объясняется спецификой реализации генераторов вредоносных документов, использующих при формировании новых поколений средств создания ВПО этого класса ограниченный набор базовых незначительно измененных программных компонентов.

**Заключение.** Представленный метод извлечения статических структурных признаков документов позволяет формировать системы обнаружения ВПО с показателями эффективности, сравнимыми с известными решениями [6, 8], а также выявить дополнительные, скрытые данные о структурных особенностях вредоносных документов.

Предложенный метод может быть применен также для документов альтернативных форматов (например, OLE2 и HTML). Использование данного подхода в комплексе с другими средствами обнаружения современных Web-угроз и противодействия им позволит эффективно обнаруживать потенциально опасные ресурсы сети Интернет.

Проведенные исследования определяют задачи для последующей серии экспериментов, направленных на более точное выявление значимых признаков отдельных структурных элементов документа и их взаимосвязей.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №10-01-00826-а), программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.2) и государственного контракта 11.519.11.4008, а также при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза “SecFutur” и MASSIF.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schultz M., Eskin E., Zadok E., Stolfo S.* Data mining methods for detection of new malicious executables // Proc. of the IEEE Symp. on Security and Privacy. Washington, DS, 2001. P. 38—49.
2. A Look at One Day of Malware Samples [Электронный ресурс]: <<http://blogs.mcafee.com/mcafee-labs/a-look-at-one-day-of-malware-samples>>.
3. *Ye Y., Li T.* Automatic malware categorization using cluster ensemble // Proc. of the 16th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, NY, 2010. P. 95—104.
4. VXHeavens [Электронный ресурс]: <<http://www.vxheavens.com>>.
5. *Gibert K., Sanchez-Marré M., Codina V.* Choosing the right data mining technique: classification of methods and intelligent recommendation // Proc. of the IEMSS 5th Biennial Meeting: Intern. Congress on Environmental Modelling and Software. Ottawa, 2010. P. 1933—1940.
6. *Комашинский Д. В., Котенко И. В.* Обнаружение вредоносных документов формата PDF на основе интеллектуального анализа данных // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2012. № 1. С. 19—35.
7. International Organization for Standardization, Portable Document Format, ISO 32000-1:2008 [Электронный ресурс]: <[http://www.images.adobe.com/www.adobe.com/content/dam/Adobe/en/devnet/pdf/pdfs/PDF32000\\_2008.pdf](http://www.images.adobe.com/www.adobe.com/content/dam/Adobe/en/devnet/pdf/pdfs/PDF32000_2008.pdf)>.
8. *Kubec J., Sejtko J.* X is not enough! Grab the PDF by the tail! // Proc. of Virus Bulletin Annual Conf., Barselona, Oct. 2011. P. 128—135.
9. *Blonce A., Filiol E., Frayssignes L.* Portable document format (PDF) security analysis and malware threats // Presentations of Europe BlackHat Conf. Amsterdam, 2008.
10. *Kolter J. Z., Maloof M. A.* Learning to detect malicious executables in the wild // Proc. of the 10th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, NY: ACM, 2004. P. 470—478.
11. *Masud M. M., Khan L., Thuraisingham B.* Feature-based techniques for auto-detection of novel email worms // Proc. of the 11th Pacific-Asia Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2007. P. 205—216.

12. *Shahzad F., Farooq M.* ELF-Miner: Using structural knowledge and data mining methods to detect new (linux) malicious executables // Knowledge and Information Systems. 2011. Vol. 30 (3). P. 589—612.
13. *Siddiqui M., Wang M., Lee J.* Detecting Internet worms using data mining techniques // J. of Systemics, Cybernetics and Informatics. 2008. Vol. 6, N 6. P. 48—53.
14. *Ye Y., Li T., Huang K., Jiang Q., Chen Y.* Hierarchical associative classifier (HAC) for malware detection from the large and imbalanced gray list // J. of Intelligent Information Systems. 2010. Vol. 35, Iss. 1. P. 1—20.
15. *Lanzi A., Balzarotti D., Kruegel C., Christodorescu M., Kirda E.* AccessMiner: Using System-Centric Models for Malware Protection. New York, NY: ACM, 2010. P. 399—412.
16. *Комашинский Д. В., Котенко И. В.* Концептуальные основы использования методов Data Mining для обнаружения вредоносного программного обеспечения // Защита информации. Инсайд. 2010. № 2. С. 74—82.
17. Open PDF Analysis Framework [Электронный ресурс]: <<http://code.google.com/p/opaf/>>.
18. Rapid – I Rapid Miner 5 [Электронный ресурс]: <<http://rapid-i.com/content/view/181/190/>>.

**Сведения об авторах****Дмитрий Владимирович Комашинский**

— аспирант; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: komashinskiy@gmail.com

**Игорь Витальевич Котенко**

— д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

УДК 004.056

Н. Ю. АНУФРИЕВА, Р. В. МЕЩЕРЯКОВ, Г. А. ШЕВЦОВА

**ОЦЕНИВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАБОТЫ  
ЦЕНТРА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Представлена современная постановка задачи оценивания качества работы центра информационного обслуживания, использующего систему электронного документооборота, которая предназначена для поддержки лиц, принимающих решения.

**Ключевые слова:** информационная система, принятие решения, критерии эффективности информационной системы.

Задачи информационного обеспечения управленческой деятельности учреждений с использованием систем электронного документооборота связаны с необходимостью формирования требований к оцениванию таких систем. Под качеством информационной системы понимается организация информационного процесса в учреждении в целом и в его отдельных службах, т.е. организация центров информационного обслуживания (ЦИО), осуществляемая в соответствии с существующими информационными технологиями с учетом обеспеченности квалифицированными кадрами и инструментарием. Иными словами, своевременность проведения исследований, отсутствие очередности при прохождении документов и минимизация времени на их обработку, малая загруженность служб, эффективное и рациональное использование имеющихся ресурсов — условия, выполнение которых позволит обеспечить высокое качество работы центров информационного обслуживания.

Данную комплексную проблему следует рассматривать с позиции системного подхода, широкого используемого при анализе сложных социальных систем различного назначения [1, 2].

На работу и учреждения, и отдельного человека влияет внешняя среда, под которой понимается совокупность природных, технических, социальных, экономических и информационных факторов. С другой стороны, функционирование учреждения зависит и от нормативных, технологических, кадровых и других аспектов, позволяющих обеспечить решение управленческих задач [3].

В общем случае работа каждого центра информационного обслуживания учреждения характеризуется множеством относительно постоянных и изменяемых параметров и может быть представлена следующим образом:

$$Y_i = (V_i, D^f_i, M_i, \tau_i),$$

где  $V_i \in V$ ,  $V = \{V_j : j = 1, \dots, u\}$  — множество видов функций, осуществляемых в ЦИО;  $D^f_i \in D^f$ ,  $D^f = \{D^f_j : j = 1, \dots, \bar{N}\}$  — множество фактических элементов в потоке информации, получаемых в результате работы информационной системы,  $\bar{N}$  определяет общее количество полученных результатов работы;  $M_i \in M$ ,  $M = \{M_j : j = 1, \dots, p\}$  — множество маршрутов движения  $j$ -х клиентов в центрах обслуживания;  $\tau_i \in \tau$ ,  $\tau = \{\tau_j : j = 1, \dots, q\}$  — множество показателей длительности обслуживания клиентов из общего числа  $q$  возможных показателей. Каждый маршрут для  $j$ -го клиента можно представить как  $M_{j,l} = (D^p_{j,l}, l, t^j_{n,l}, t^j_{h,l} : l = 1, \dots, m)$ , где  $D^p_{j,l} \in D^p$ ,  $D^p = \{D^p_{j,l} : j = 1, \dots, \bar{N}; l = 1, \dots, m\}$  — множество предварительных данных о  $j$ -м клиенте, устанавливаемых в  $l$ -м центре обслуживания при общем числе ЦИО  $m$ ;  $t^j_{n,l}, t^j_{h,l}$  — время начала и окончания обслуживания  $j$ -го клиента в  $l$ -м ЦИО соответственно;

Кадровое обеспечение центров информационного обслуживания можно определить следующим образом:

$$K_Y = (C_Y, G_Y, Z_Y, E_Y(D^p_j, D^f_{j,l}), q_k(t^j_{n,l})),$$

где  $C_Y \in C$ ,  $C = \{C_i : i = 1, \dots, \varphi\}$  — множество специалистов, занятых в ЦИО;  $G_Y \in G$ ,  $G = \{G_i : i = 1, \dots, L\}$  — множество показателей, характеризующих квалификацию специалистов из общего числа категорий  $L$ ;  $Z_Y \in Z$ ,  $Z = \{Z_i : i = 1, \dots, k\}$  — множество, характеризующее размеры заработной платы специалистов;  $E_Y(D^p_j, D^f_{j,l})$  — эвристические функции, определяющие процедуры вывода специалистами результатов исследования с учетом предварительных данных  $D^p_j$ ;  $q_k(t^j_{n,l})$  — функция, определяющая факт наличия специалиста:

$$q_k(t^j_{n,l}) = \begin{cases} 1, & \text{если в } l\text{-м ЦИО имеется } k\text{-й специалист} \\ & \text{в момент } t^j_{n,l} \text{ начала обслуживания } j\text{-го клиента;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Ресурсное обеспечение ЦИО характеризуется наличием инструментального оборудования, необходимого для точного и своевременного предоставления информационных услуг, и описывается следующим образом:

$$R_i = (D^f_i, W_i, g_i(t^j_{n,l})),$$

где  $W_i \in W$ ,  $W = \{W_j : j = 1, \dots, w\}$  — множество показателей, характеризующих нагрузку на оборудование центров обслуживания (количество выполненных исследований за период вре-



мени или в расчете на некоторое количество клиентов);  $g_i(t_{n,l}^j)$  — функция, определяющая доступность оборудования:

$$g_i(t_{n,l}^j) = \begin{cases} 1, & \text{если в } l\text{-м ЦИО имеется } i\text{-е оборудование, доступное} \\ & \text{в момент } t_{n,l}^j \text{ начала обслуживания } j\text{-го клиента;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Под технологией информирования клиента понимается маршрут прохождения им центров обслуживания, назначенных в соответствии с предварительными данными  $D_j^p$  с учетом кадрового обеспечения, нагрузки на оборудование и нормативов финансирования по видам исследований:

$$U_D = F_D(V, Q),$$

где  $U_D$  — вид финансирования (как правило, бюджетный, обязательный или добровольный);  $Q$  — объем финансирования по каждому виду исследований.

Таким образом, маршрут прохождения  $j$ -м клиентом центров информационного обслуживания может быть описан функцией, зависящей от предварительного информирования клиента, вида финансирования данного маршрута, наличия  $k$ -го специалиста и доступности  $i$ -го оборудования (ресурса) в  $l$ -м ЦИО:

$$M_j = F^j(D_{j,l}^p, U_{D,j}, q_k(t_{n,l}^j), g_i(t_{n,l}^j)).$$

Исходя из того, что рассматривается не „проектная“ технология, соответствующая всем возможным случаям обслуживания, а персонально-ориентированная, определяющая маршрут клиента по заданным ЦИО, объединение назначенных персонально-ориентированных маршрутов в некоторый временной период (день, неделя и т.д.) и будет определять фактически реализуемые технологии исследования в учреждении, т.е.

$$T_D = \bigcup_{j=1}^p M_j.$$

Качество обслуживания, с точки зрения клиента, определяется множеством объективных и субъективных факторов. В соответствии с поступившей заявкой и выполняемыми функциями клиенту назначается персонально-ориентированный маршрут (в виде последовательности перехода из одного ЦИО в другой) для подтверждения субъективных оценок специалистов. Этот маршрут может уточняться или корректироваться, пока не будут установлены точные, с точки зрения специалиста, рекомендации по принятию решений:

$$P_t^j \rightarrow D_{j,l}^p \rightarrow M_j \rightarrow D_{j,l-1}^f \rightarrow M_j \rightarrow D_{j,l}^f.$$

Количество вариантов управленческих решений может быть определено как „пересечение“ множеств клиентов, с учетом различных видов выполняемых по заявкам исследований, и множеств центров обслуживания, свободных к моменту принятия решения. Это объективно обуславливает необходимость использования в момент определения маршрута значительного объема информации о текущем состоянии учреждения, клиента, информационной системы в целом и т.д.

Рассмотренный подход к оцениванию эффективности формирования выполняемых центром обслуживания функций является субъективным. Поэтому целесообразно использовать и критерий результативности работы ЦИО как сумму экспертных оценок специалистов [2, 4]:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{r_i^s} p_i \bigg/ \sum_{i=1}^n p_i,$$

где  $r_i$  и  $r_i^s$  —  $i$ -й фактический и стандартный показатели результативности;  $p_i$  — ранг (вес)  $i$ -го показателя (от 1 до 10).

Полученный критерий (от 0 до 1) рассчитывается для каждого центра информационного обслуживания и является индикатором наличия проблем в том или ином центре и основанием для администрации учреждения о принятии управленческих решений с использованием информационной системы. Совокупность критериев результативности всех служб учреждения позволит оценить эффективность деятельности учреждения в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.* Введение в системный анализ. М.: Высш. школа, 1989. 367 с.
2. *Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.* Основы системного анализа. Томск: Изд-во НТЛ, 1997. 368 с.
3. *Юсупов Р. М., Ронжин А. Л., Прищепина М. В., Ронжин Ал. Л.* Модели и программно-аппаратные решения автоматизированного управления интеллектуальным залом // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 39—49.
4. *Мещеряков Р. В., Савчук М. В.* Подходы к внедрению ERP-систем на крупных предприятиях // Бизнес-информатика. 2011. № 2 (16). С. 63—67.

#### *Сведения об авторах*

- Наталья Юрьевна Ануфриева** — канд. техн. наук, доцент; Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И. Позунова, центр информационных технологий; E-mail: nata@bti.secna.ru
- Роман Валерьевич Мещеряков** — канд. техн. наук, доцент; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Институт системной интеграции и безопасности; зам. директора; E-mail: mrv@security.tomsk.ru
- Галина Александровна Шевцова** — канд. истор. наук, доцент; Российский государственный гуманитарный университет, кафедра организационно-правовой защиты информации, Москва; E-mail: shevtsova-g@rambler.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.

А. А. КОСТИН, А. А. КОСТИНА, Д. М. ЛАТЫШЕВ, А. А. МОЛДОВЯН

## ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ СЕРИИ „АУРА“ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассматриваются возможности программных комплексов серии „Аура“ для защиты информационных систем персональных данных в соответствии с требованиями Федерального закона № 152-ФЗ „О персональных данных“.

*Ключевые слова:* защита информации, персональные данные, информационные системы персональных данных.

**Актуальность защиты персональных данных.** В 2006 г. был опубликован Федеральный закон № 152-ФЗ „О персональных данных“. Цель Федерального закона — обеспечение защиты прав и свобод граждан при обработке их персональных данных, в том числе защиты прав на неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну. Этот закон определяет следующие понятия:

**персональные данные** — любая информация, относящаяся прямо или косвенно к определенному или определяемому физическому лицу (субъекту персональных данных);

**оператор** — государственный орган, муниципальный орган, юридическое или физическое лицо, самостоятельно или совместно с другими лицами организующие и (или) осуществляющие обработку персональных данных, а также определяющие цели и содержание обработки персональных данных;

**обработка персональных данных** — любое действие (операция) или совокупность действий (операций), совершаемых с персональными данными с использованием средств автоматизации или без их использования, включая сбор, запись, систематизацию, накопление, хранение, уточнение (обновление, изменение), извлечение, использование, передачу (распространение, предоставление, доступ), обезличивание, блокирование, удаление, уничтожение;

**информационные системы персональных данных** — совокупность содержащихся в базах данных персональных сведений о гражданах и обеспечивающих их обработку информационных технологий и технических средств.

Федеральный закон прямо обязывает операторов при обработке персональных данных принимать необходимые правовые, организационные и технические меры или обеспечивать их принятие для защиты данных от неправомерного или случайного доступа к ним, уничтожения, изменения, блокирования, копирования, предоставления и распространения, а также от иных неправомерных действий. По оценке Роскомнадзора число операторов в Российской Федерации превышает 2,5 млн. Таким образом, защита информационных систем персональных данных является массовой и актуальной проблемой.

Операторы, которые осуществляли обработку персональных данных до 1 июля 2011 г., обязаны представить определенные сведения в уполномоченный орган по защите прав субъектов персональных данных (Роскомнадзор) не позднее 1 января 2013 г. На 4 июня 2012 г. в реестре содержится информация о 245 100 операторах персональных данных, что составляет всего около 10 % от общего числа операторов.

С учетом прогнозной численности Роскомнадзор отображает в своем отчете за 2011 г. соотношение числа операторов, подавших уведомление, и операторов, до настоящего времени не исполнивших эту обязанность, по категориям операторов следующими данными:

— государственных органов — 10 526, что составляет 40,6 % от их прогнозной численности;

— муниципальных органов — 37 419, что составляет 49,5 % от их прогнозной численности;

— юридических лиц — 170 082, что составляет 10,2 % от их прогнозной численности;

— физических лиц — 11 885, что составляет 1,3 % от их прогнозной численности.

**Проблемы защиты персональных данных.** Мероприятия по обеспечению безопасности персональных данных (ПД) при их обработке в информационной системе персональных данных (ИСПД) могут включать следующие операции:

— определение угроз безопасности ПД и их актуальности;

— разработку на основе модели угроз системы защиты ПД;

— проверку готовности системы защиты ПД;

— установку и ввод в эксплуатацию системы защиты ПД;

— обучение лиц, использующих средства защиты информации (СЗИ);

— учет применяемых СЗИ и лиц, эксплуатирующих их;

— контроль за использованием СЗИ;

— описание системы защиты ПД.

План работ по защите персональных данных может иметь следующий вид.

1. Назначить подразделение (должностное лицо), ответственное за защиту ПД.

2. Сформировать комплект нормативных правовых актов Роскомнадзора, Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) и Федеральной службы безопасности (ФСБ) России, изучить их требования и рекомендации.

3. Провести аудит ИСПД и оценить полноту выполнения требований нормативных правовых актов по защите ПД. Определить категории ПД и провести классификацию ИСПД, сформировать перечень ПД, спланировать работы по созданию системы защиты ПД.

4. Документально регламентировать работу с ПД. Разработать организационно-распорядительные документы по защите ПД. Получить согласие субъектов на обработку ПД.

5. Определить актуальные угрозы безопасности ПД и сформировать модель угроз. Уточнить класс специальных ИСПД. Разработать техническое задание и техпроект на создание (доработку) системы защиты ПД.

6. Привести систему защиты ПД в соответствие с требованиями нормативных правовых актов ФСБ и ФСТЭК России для установленного класса ИСПД. Установить необходимые сертифицированные СЗИ: антивирусной защиты, защиты от несанкционированного доступа, шифрования, защиты при межсетевом взаимодействии, защиты от утечки по техническим каналам.

7. Обучить лиц, ответственных за защиту ПД и работающих с ИСПД.

8. Получить лицензию на деятельность по технической защите конфиденциальной информации.

9. Уведомить Роскомнадзор об обработке ПД.

10. Организовать эксплуатацию защищенных ИСПД, мониторинг и реагирование на угрозы ИСПД в соответствии с требованиями по безопасности.

Выполнение такого плана для многих операторов — нетривиальная задача.

В число операторов, включенных в реестр, входят (отчет Роскомнадзора за 2011 г.) следующие организации:

— дошкольные учреждения — 29 010;

— общеобразовательные школы — 23 665;

— учреждения здравоохранения и социального развития — 12 724;

— средние и высшие учебные заведения — 2 212.

Для подавляющего большинства этих организаций сложности в реализации требований закона заключаются в первую очередь в нехватке кадров, недостатке средств и неясности в вопросе, что и как делать. Другой проблемой является ограниченное число лицензиатов ФСТЭК и ФСБ России, способных выполнить услуги по защите ПД на качественном уровне,

что приводит к высокой стоимости этих видов работ. Повышенная затратность в реализации требований закона вызвана и определенным монополизмом, а также явлениями коррупции, проникшей и в эту сферу человеческой деятельности.

**Программные комплексы серии „Аура“.** СПИИРАН, выполняя фундаментальные и прикладные исследования в области информационных технологий и защиты информации, разработал и серийно производит средства защиты информации от несанкционированного доступа (СЗИ НСД): „СГУ-2“, „Щит-РЖД“, „Аура“, „Аура 1.2.4“ (<http://www.cobra.ru>). Все перечисленные средства имеют сертификаты ФСТЭК России и зарегистрированы в государственном реестре программ для ЭВМ.

В состав семейства СЗИ НСД серии „Аура“ входят:

— СЗИ НСД „Аура“ (версия 1.1.2, сертификат ФСТЭК № 2188 от 21 октября 2010 г.), сертифицировано по 3-му классу защищенности средств вычислительной техники (СВТ) и 2-му уровню контроля недекларированных возможностей (НДВ), обеспечивает возможность построения автоматизированных систем (АС), отвечающих классу 1Б, 1В, 1Г, 1Д, и информационных систем по обработке персональных данных по классам К1, К2, К3, К4;

— СЗИ НСД „Аура 1.2.4“ (версия 1.2.4, сертификат ФСТЭК № 2527 от 26 декабря 2011 г.), сертифицировано по 5-му классу защищенности СВТ и 4-му уровню контроля НДВ, обеспечивает возможность построения АС, отвечающих классу 1Г, 1Д, и информационных систем по обработке персональных данных по классам К1, К2, К3, К4;

— СЗИ НСД „Аура 1.2“ (версия 1.2, проходит сертификацию), предназначено для замены СЗИ НСД „Аура“ (версия 1.1.2).

СЗИ НСД серии „Аура“ предназначены для комплексной защиты информации, обрабатываемой на компьютере под управлением 32/64-битовых операционных систем (ОС) Windows 2000/XP/Vista/7 Server 2000/2003/2008/2008R2.

СЗИ НСД серии „Аура“ являются классическими системами защиты информации и могут широко применяться на межотраслевом уровне для обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем [1].

При разработке СЗИ НСД серии „Аура“ основные исследования были направлены на замещение (или дублирование) наиболее важных, с точки зрения безопасности, механизмов ОС на собственные модули, а также введение дополнительных. В этом случае механизмы ОС (например, аутентификация) становятся вспомогательными, так как основную функцию выполняют модули СЗИ НСД. Некоторые механизмы (например, доверенная среда СЗИ НСД с графическим интерфейсом) имеют уникальный характер и позволяют существенно расширить возможности средств защиты.

Наличие собственных механизмов СЗИ позволяет обеспечить безопасность информации в случае взлома механизмов ОС (например, в случае уязвимости ОС). Кроме того, расширенный независимый от операционной системы мониторинг событий позволяет изучить возникающие проблемы и своевременно на них реагировать.

#### **Преимущества СЗИ НСД серии „Аура“.**

##### **1. Совместимость:**

— совместимость с доменами Active Directory, отсутствие необходимости смены настроек домена;

— поддержка как 32-, так и 64-битовых версий операционных систем;

— поддержка ОС Windows 7;

— выполнение блокировки консоли по нескольким типам электронных ключей (Rutoken 1.0/2.0/3.0, eToken PRO, eToken Java) и USB флеш-дискам.

##### **2. Усиление защиты операционной системы:**

— возможность двухфакторной аутентификации (аутентификации по паролю и разблокировки консоли по электронному ключу);

- выполнение контроля печати из всех приложений;
- контроль доступа к дискам с файловыми системами FAT/CDFS/NTFS;
- регистрация обращений к файлам на дисковых системах FAT/CDFS/NTFS;
- гарантированное „затирање“ свободного места на дисках и выборочное „затирање“ файлов;
- организация работы пользователей, исключающая возможность несанкционированного считывания информации со съемных носителей, в том числе при их выносе за пределы организации;
- двухфакторная аутентификация сетевых пользователей;
- возможность реализации такого варианта настройки СЗИ, при котором пользователь не будет знать свой пароль в ОС/Active Directory.

### 3. Технологичность:

- возможность функционирования домена безопасности без домена Active Directory;
- централизованное управление;
- возможность функционирования консоли управления доменом безопасности с любого разрешенного администратором рабочего места, причем установка дополнительного программного обеспечения (ПО) на это рабочее место не требуется;
- отсутствие необходимости установки дополнительного ПО (SQL-сервера и т.п.) на сервер безопасности;
- четкая иерархия пользователей;
- возможность постепенного развертывания СЗИ, в том числе при наличии домена Active Directory;
- возможность дистанционной автоматической установки;
- единый дистрибутив для установки на серверы и рабочие станции.

**Применение алгоритмов шифрования.** В настоящее время общепризнано применение криптографии для реализации эффективных механизмов защиты информации. Реализация алгоритмов криптографического преобразования в реальных системах защиты информации имеет определенные технические и организационные трудности и требует специальных подходов [2—8].

Алгоритмы криптографического преобразования применяются для решения следующих задач:

- аутентификация;
- контроль целостности;
- шифрование документов (файлов);
- шифрование участков памяти машинных носителей информации;
- шифрование машинных носителей информации в целом;
- шифрование информации, циркулирующей в компьютерных сетях;
- цифровая подпись файлов;
- шифрование баз данных, содержащих пароли пользователей и права доступа;
- гарантированное уничтожение информации.

Криптофункции могут быть реализованы непосредственно СЗИ НСД или в составе специализированного средства, которое может быть независимым либо интегрировано с СЗИ. СЗИ НСД „Аура“ включает набор функций специального преобразования информации, которые существенно повышают уровень ее защищенности и обеспечивают дополнительные возможности средства защиты (например, привязку съемных машинных носителей к конкретным компьютерам). СЗИ НСД „Аура 1.2.4“ не обладает возможностью шифрования документов, однако оно может быть интегрировано с самостоятельным программным комплексом, ориентированным на реализацию алгоритмов шифрования.

**Проблемы безвозмездного распространения программных средств защиты информации.** Необходимым элементом обеспечения защиты информационных систем персональных данных является использование СЗИ НСД. Средняя рыночная цена СЗИ НСД составляет около 4 тыс. руб. для защиты одного рабочего места. СЗИ НСД серии „Аура“ являются программными комплексами и могут быть распространены по лицензионным соглашениям.

Принимая во внимание сложности в реализации мероприятий для исполнения Федерального закона № 152-ФЗ „О персональных данных“, СПИИРАН предоставляет образовательным, воспитательным и лечебным учреждениям, финансируемым из госбюджета, право безвозмездного и бессрочного использования СЗИ НСД „Аура 1.2.4“ для образовательных целей и защиты персональных данных.

На сайте института <http://www.spiiras.nw.ru> и сайте отдела проблем информационной безопасности <http://www.cobra.ru> опубликована информация о возможности безвозмездного и бессрочного пользования разработанными СПИИРАН программными средствами. СЗИ НСД „Аура 1.2.4“ и вся необходимая документация размещены для свободного копирования на сайте <http://www.cobra.ru>.

Однако имеется ряд проблем, препятствующих возможности безвозмездного и широкого распространения СЗИ НСД:

- существующие правила производства и распространения СЗИ не рассчитаны на электронные технологии (требуются знаки соответствия, заверенные копии документов, машинный носитель, формуляр);
- процедуры сертификации и продления сертификата весьма затратны;
- техническое сопровождение при масштабном распространении СЗИ становится обременительным;
- дистрибьюторы мало заинтересованы в продвижении программного продукта.

Решение этих проблем позволит расширить перечень инновационной продукции и круг организаций, которые смогут безвозмездно либо на льготной основе использовать результаты интеллектуальной деятельности СПИИРАН в области защиты информации.

Несмотря на актуальность задачи защиты ПД, которая к тому же носит массовый характер, за 7 месяцев информирования общества о возможности бесплатного использования средств защиты СПИИРАН получил с территории РФ всего 18 запросов о предоставлении СЗИ НСД „Аура 1.2.4“ на безвозмездной основе. Явное несоответствие количества запросов и числа операторов персональных данных, не решивших задачи их защиты, симптоматично и требует отдельного исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молдовян А. А., Юсупов Р. М. Проблемы информатизации и вопросы информационной безопасности транспортной отрасли // Транспортная безопасность и технологии. 2010. № 3 (23). С. 120—122.
2. Молдовян А. А. Криптография для защиты компьютерной информации (часть 1) // Интеграл. 2004. № 4 (18). С. 42—43.
3. Молдовян А. А. Криптография для защиты компьютерной информации (часть 2) // Интеграл. 2004. № 5 (19). С. 60—61.
4. Молдовян А. А. Некоторые вопросы защиты программной среды ПЭВМ // Безопасность информационных технологий. 1995. № 2. С. 22—28.
5. Молдовян А. А. Подход к созданию средств защиты информации массового применения // Управление защитой информации. 1998. Т. 2, № 1. С. 26—27.
6. Молдовян А. А., Молдовян Н. А. Программные механизмы защиты ЭВМ // Банковские технологии. 1997. № 1 (23). С. 68—70.

7. Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Молдовян П. А. Новый метод криптографических преобразований для современных систем защиты ПЭВМ // Управляющие системы и машины. 1992. № 9/10. С. 44—50.
8. Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Молдовян П. А. Программная реализация технологии прозрачной защиты ЭВМ // Управляющие системы и машины. 1996. № 4/5. С. 38—47.

**Сведения об авторах**

- Андрей Алексеевич Костин** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория криптологии;  
E-mail: info@iias.spb.su
- Анна Александровна Костина** — СПИИРАН, лаборатория криптологии; науч. сотрудник;  
E-mail: info@iias.spb.su
- Дмитрий Михайлович Латышев** — СПИИРАН, лаборатория криптологии; науч. сотрудник;  
E-mail: info@iias.spb.su
- Александр Андреевич Молдовян** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; заместитель директора;  
E-mail: maa1305@yandex.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
10.06.12 г.



# SUMMARY

**P. 7—13.**

## **METHODOLOGICAL BASIS OF PLANNING STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RECONFIGURATION OF COMPLEX OBJECTS**

The problems of structural and functional reconfiguration of complex objects are considered. Methodological principles of solution of corresponding planning problems are developed in the frames of the management theory of structural dynamics of complex organizational and technical systems.

**Keywords:** complex object, structural and functional reconfiguration, methodological basis.

### *Data on author*

*Alexander N. Pavlov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: pavlov62@list.ru

**P. 13—17.**

## **DYNAMIC INTERPRETATION OF COMPLEX OBJECT LIFE CYCLE MANAGEMENT**

Current status of research in complex object life cycle management is analyzed. An original dynamic interpretation of the processes under investigation based on structure dynamics control theory is proposed.

**Keywords:** complex object life cycle, structure dynamics control, complex modeling.

### *Data on author*

*Oleg V. Maidanovich* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Mathematics and Programming; E-mail: sid.sn@yandex.ru

**P. 17—22.**

## **COMBINED METHOD FOR OPERATION PLANNING AND RESOURCE ALLOCATION IN ACTIVE MOBILE OBJECTS CONTROL SYSTEM**

The active mobile object control system (AMO CS) is considered. An integrated structure and dynamic models of AMO CS are developed. Combined methods and algorithms of planning and scheduling in the system are developed. The general advantage of the proposed methods and algorithms results from the comprehensive consideration of main constraints of investigation area on the base of integrated approach.

**Keywords:** integrated planning and scheduling, active mobile object, combined methods of modeling and optimization.

### *Data on authors*

*Sergey V. Kokorin* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Junior Scientist; E-mail: kokorins@list.ru

- Semyon A. Potryasaev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Boris V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences; Deputy Director for R&D; E-mail: sokol@ias.spb.su

**P. 23—28.****OPTICAL-ELECTRONIC DEVICE FOR AUTOMATIC LANDING OF THE SELF-CONTAINED FLYING ROBOT**

A prototype of navigation optical-electronic device for the automatic landing of the small-size self-contained flying robot is proposed. General schematic and basic principles of the device design are described; dominant errors of it are analyzed. Results of bench and full-scale mockup tests are presented.

**Keywords:** optical-electronic device, automatic landing, automatic control system, self-contained flying robot.

*Data on author*

- Valery O. Ivanov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Applied Informatics and the Problems of Society Informatization; E-mail: ivanov4mail@gmail.com

**P. 29—33.****COMPLIANT MOTION CONTROL ALGORITHM FOR FLEXIBLE JOINT MANIPULATOR WITH PARTIAL DYNAMIC COMPENSATION**

Various approaches to compliant motion control for flexible joint robots are discussed and analyzed. A method is proposed to increase the dynamic accuracy of the control.

**Keywords:** manipulator, robot, force control, impedance control, flexible joints.

*Data on author*

- Victor V. Titov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Informational Technologies for Control and Robotics; E-mail: victortitov2005@mail.ru

**P. 34—37.****INFORMATION SYSTEM FOR ELECTROGASTROGRAPHY DATA STORAGE AND PROCESSING**

The problems of organization of an information system for gastrography data storage and processing are considered. A scheme of the system is proposed, requirements to the system implementation allowing for remote operation are formulated.

**Keywords:** electrogastrography, storage system, medical information system.

*Data on author*

- Ekaterina A. Latukhina* — M. V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Institute of Mathematics, Information, and Space Technologies; Department of Programming and High Performance Computing, Arkhangelsk; Senior Lecturer; E-mail: ealatukhina@yandex.ru

**P. 38—43.****METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION SYSTEM PERFORMANCE**

The state-of-the-art methodology of quantitative evaluation of automatic systems for speech recognition and speaker diarization is presented. Various measures and methods for estimation of automatic speech recognition results by criteria of speech recognition accuracy and signal processing speed are described.

**Keywords:** automatic speech recognition, speech recognition accuracy, evaluation criteria and measures.

**Data on authors**

- Alexey A. Karpov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces;  
E-mail: karpov@iias.spb.su
- Irina S. Kipyatkova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces;  
E-mail: kipyatkova@iias.spb.su

**P. 43—46.****ANALYSIS OF MODERN METHODS AND SYSTEMS FOR SPEAKER DIARIZATION**

The problem of diarization of several speakers speech recorded with single or multi-channel audio system is considered. Modern approaches to the problem solution are analyzed, methods for evaluation of speaker diarization system performance are presented.

**Keywords:** digital processing of audio signal, speaker diarization, diarization error rate.

**Data on authors**

- Andrey L. Ronzhin* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces; E-mail: ronzhin@iias.spb.su
- Viktor Yu. Budkov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces;  
E-mail: budkov@iias.spb.su

**P. 46—51.****DESIGN FEATURES OF USER INTERFACE OF MOBILE INFORMATIONAL ROBOT**

Several features of human-computer interface design are analyzed by the example of user interface of mobile informational robot providing enquiry services. The robot operation modes are described.

**Keywords:** dialog system, mobile informational robot, multimodal interface.

**Data on authors**

- Maria V. Prishchepa* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces; Junior Scientist;  
E-mail: prischepa@iias.spb.su
- Konstantin Yu. Baranov* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces; Programmer;  
E-mail: baranov@iias.spb.su

**P. 52—57.****MODEL OF CONFIGURATING OF SECURE AND ENERGY-EFFICIENT EMBEDDED SYSTEMS**

A configuration technique is proposed to facilitate the design of secure embedded devices. The model enables search for the most effective combinations of security building blocks in terms of consumption of device resources.

**Keywords:** embedded sistem, information security, design of secure embedded devices, embedded device configuration.

*Data on authors*

- Vasily A. Desnitsky** — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Computer Security Problems; 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, Laboratory of Computer Security Problems; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru

**P. 58—63.****METHOD OF STRUCTURAL FEATURE EXTRACTION FOR MALWARE DETECTION**

The approach to malicious documents detection based on the application of machine learning, previously proposed by the authors, is applied to development of a method for extraction of static structural features from a data stream. The method makes use of structural features of malicious document elements and linkage between them.

**Keywords:** feature extraction, malware, classification.

*Data on authors*

- Dmitry V. Komashinckiy** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Computer Security Problems; E-mail: komashinskiy@gmail.com
- Igor V. Kotenko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Computer Security Problems; E-mail: ivkote@comsec.spb.ru

**P. 63—66.****EFFICIENCY ESTIMATION OF INFORMATION SERVICE CENTER**

Information system containing electronic documents and designed to support decision makers is considered. A modern formulation of the problem of assessment of performance of the information system is presented.

**Keywords:** information system, electronic document management, decision-making.

*Data on authors*

- Natalya Yu. Anufrieva** — Cand. Techn. Sci.; I. I. Polzunov Altai State Technical University, Biysk Technological Institute; Center of Information Technologies; E-mail: nata@bti.secna.ru
- Roman V. Meshcheryakov** — Cand. Techn. Sci.; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Institute of System Integration and Security; E-mail: mrv@security.tomsk.ru
- Galina A. Shevtsova** — Cand. Hist. Sci.; Russian State University for Humanities, Department of Legal Protection Information, Moscow; E-mail: shevtsova-g@rambler.ru

---

**P. 67—72.**

**“AURA” PROGRAM COMPLEXES FOR PERSONAL DATA INFORMATION SYSTEM PROTECTION**

Innovative features of the software product “Aura” related to protection of information systems for personal data processing are considered. Consistency with Russian Federal Law "On Personal Data" is discussed.

**Keywords:** information security, personal data, personal data systems.

*Data on authors*

- Andrey A. Kostin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Cryptology; E-mail: info@iias.spb.su
- Anna A. Kostina* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Cryptology; Scientist; E-mail: info@iias.spb.su
- Dmitry M. Latyshev* — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Cryptology; Scientist; E-mail: info@iias.spb.su
- Aleksander A. Moldovyan* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Information Security; E-mail: maa1305@yandex.ru