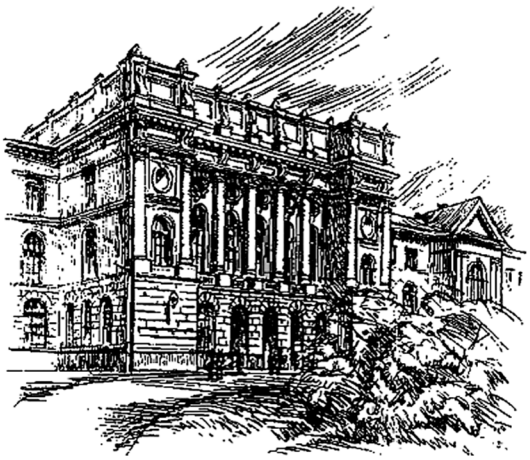
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

## САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## Информатика. Телекоммуникации. Управление

**1(164) 2013**

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2013

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

*Алферов Ж.И.*, академик РАН; *Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);
*Костюк В.В.*, академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;
*Окрепилов В.В.*, академик РАН; *Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН;
*Патон Б.Е.*, академик НАН Украины и РАН; *Федоров М.П.*, академик РАН;
*Фортов В.Е.*, академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
*Бабкин А.В.*, д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
*Боронин В.Н.*, д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
*Дегтярева Р.В.*, д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
*Иванов В.К.*, д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
*Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

# ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН – председатель;
*Абрамов С.М.*, чл.-кор. РАН;
*Воеводин В.В.*, чл.-кор. РАН;
*Заборовский В.С.*, д-р техн. наук, профессор;
*Козлов В.Н.*, д-р техн. наук, профессор;
*Фотиади А.Э.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
*Черноруцкий И.Г.*, д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН – председатель;
*Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
*Бабкин А.В.*, д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
*Антонов В.И.*, д-р техн. наук, профессор;
*Голландцев Ю.А.*, д-р техн. наук, профессор;
*Карпов Ю.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
*Коротков А.С.*, д-р техн. наук, профессор;
*Макаров С.Б.*, д-р техн. наук, профессор;
*Устинов С.М.*, д-р техн. наук, профессор;
*Цикин И.А.*, д-р техн. наук, профессор;
*Шкодырев В.П.*, д-р техн. наук, профессор;
*Клавдиев В.Е.*, канд. техн. наук, доцент.



*Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.*

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Подписной индекс **47517** в каталоге «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте http://www.elibrary.ru



При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

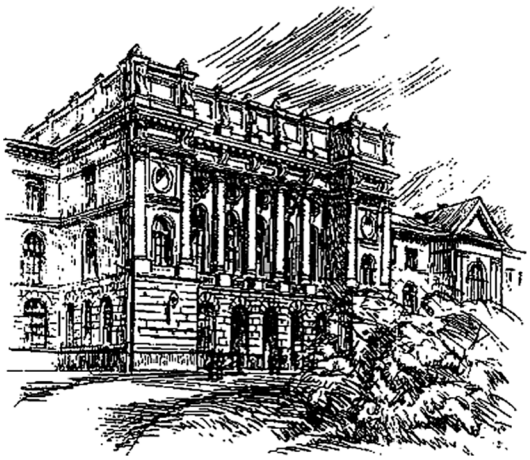


Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.



© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



# ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

## Computer Science. Telecommunications and Control Systems

1(164) 2013

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2013

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

EDITORIAL COUNCIL

*Y.S.Vasiliev* – full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University, editor-in-chief; *Zh.I. Alferov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Kostiuk* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Lopota* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Okrepilov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *B.E.Paton* – full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Scences of Ukraine; *A.I. Rudskoy* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *M.P. Fedorov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.E. Fortov* – full member of the Russian Academy of Sciences.

EDITORIAL BOARD

*Y.S. Vasiliev* – full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University, editor-in-chief; *D.G. Arseniev* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *A.V. Babkin* – Dr.Sc. (econ.), prof., deputy editor-in-chief; *V.N. Boronin* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *V.V. Glukhov* – Dr.Sc. (econ.), prof.; *R.V. Degtyareva - Dr.Sc. (history), prof.; A.V. Ivanov – Dr.Sc.(tech.); V.K.Ivanov* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *V.V. Kozlovsky* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *A.I. Rudskoy* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, deputy editor-in-chief; *R.M. Yusupov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences.

COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

*R.M. Yusupov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of the editorial council; *S.M. Abramov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Voevodin* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.S. Zaborovsky* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *V.N. Kozlov* – Dr.Sc.(tech.), prof.; *A.E. Fotiadi* – Dr.Sc.(phys.-math.), prof.; *I.G. Chernorutsky* – Dr.Sc.(tech.), prof.

EDITORIAL BOARD

*R.M. Yusupov* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of the editorial board;
*D.G. Arseniev* – Dr.Sc.(tech.), prof., deputy head of the editorial board;
*A.V. Babkin* – Dr.Sc. (econ.), prof., deputy head of the editorial board;
*V.I. Antonov* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*Y.A. Gollandtsev* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*Y.G. Karpov* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*A.S. Korotkov* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*S.B. Makarov* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*S.M.Ustinov* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*I.A. Tsikin* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*V.P. Shkodyrev* – Dr.Sc.(tech.), prof.;
*V.Ye. Klavdiev* – Candidate of Technical Sciences, associate prof.

*The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).*

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal and Ulrich's Periodical Directory International Database.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

Subscription index **47517** in the «Journals and Magazines» catalogue, Rospechat agency.

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database
© Scientific Electronic Library (http://elibrary.ru/).

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

© St. Petersburg State Polytechnical University, 2013

# Содержание


**Инфокоммуникационные технологии**

**Медведев Т.А., Стручков И.В.** *Архитектура программного слоя доступа к реляционным базам данных для масштабируемых гибридно-облачных систем* ..... 9

**Телекоммуникационные системы и компьютерные сети**

**Садовников В.Ю.** *Сравнение алгоритмов распределения ресурсов сетей доступа* ..... 17

**Проблемы передачи и обработки информации**

**Лобанов Н.А.** *Алгоритм распределения данных по поднесущим для беспроводных систем связи на основе OFDM сигнала* ..... 21

**Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства**

**Сороцкий В.А., Царев В.М.** *Методы формирования сигналов в радиопередающих устройствах перспективных навигационных систем* ..... 25

**Системный анализ и управление**

**Поляк М.Д.** *Модель стохастической искусственной нейронной сети в задачах распознавания образов* ..... 33

**Соловьев Д.С., Литовка Ю.В.** *Получение распределения толщины гальванического покрытия с повышенной равномерностью* ..... 39

**Нестеров С.А.** *Интеллектуальный анализ данных сервера управления антивирусной защитой* ..... 44

**Масюк А.А., Сараджишвили С.Э.** *Тематическая категоризация ресурсов в системах контентной фильтрации* ..... 50

**Брунарский П.Н.** *Обучение мобильного робота движению по траектории со сложными ограничениями* ..... 57

**Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии**

**Бронштейн Е.М., Гиндуллин Р.В.** *Об одном классе задач маршрутизации* ..... 63

**Масловская А.Г.** *Применение вариационных принципов для компьютерного моделирования динамики доменной границы сегнетоэлектрика в поле градиента температуры* ..... 68

**Гончар И.В., Падерно П.И.** *Управление эргономическим реинжинирингом рабочих мест* ..... 75

**Электроника, технологии производства материалов электронной техники**

**Морозов Д.В., Енученко М.С.** *Цифро-аналоговые преобразователи с унарной и сегментной архитектурами* ..... 81

**Морозов Д.В., Буданов Д.О.** *Шифратор термометрического кода в прямой двоичный код* ..... 87

## Управление в социальных и экономических системах

**Куприянов Ю.В., Таратухин В.В.** *Формализованный подход управления организационной трансформацией при внедрении информационной системы на промышленном предприятии* ..... 93

## Робототехника и мехатроника

**Лопота А.В., Юревич Е.И.** *Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем* ..... 98

**Половко С.А., Шубин П.К., Юдин В.И.** *Концептуальные вопросы роботизации морской техники* ..... 104

**Градовцев А.А., Кондратьев А.С., Лопота А.В.** *Средства робототехнического обеспечения функций перспективной космической инфраструктуры* ..... 111

**Васильев И.А., Половко С.А., Смирнова Е.Ю.** *Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники* ..... 119

**Васильев А.В.** *Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов* ..... 124

**Иванов А.А., Шмаков О.А., Демидов Д.А.** *Экспериментальное исследование змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3»* ..... 132

**Рабинович Б.А., Юревич Е.И.** *Системы измерения и контроля параметров газовых и жидких сред на космических аппаратах* ..... 139

**Грязнов Н.А., Лопота А.В., Соснов Е.Н.** *Комплексный подход к решению задач медицинской робототехники* ..... 144

**Сенчик К.Ю., Харламов В.В.** *Перспективы создания миниатюрных мехатронных аппаратов поддержания кровообращения в организме человека в экстремальных ситуациях* ..... 148

**Резник О.Н., Скворцов А.Е., Резник А.О.** *Сохранение жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной гемоперфузии* ..... 151

*Сведения об авторах* ..... 155

# Contents

**Infocommunication technologies**

**Medvedev T.A., Struchkov I.V.** *Middleware architecture for relational database access in a scalable hybrid cloud system* ..... 9

**Telecommunication systems and computer networks**

**Sadovnikov V.Yu.** *Comparison of algorithms for the resource distribution between access networks* ..... 17

**Information transfer and processing**

**Lobanov N.A.** *Allocation algorithm for data subcarriers for wireless communication systems based on OFDM signal* ..... 21

**Radio engineering, aerials, SHF-devices**

**Sorotsky V.A., Tsarev V.M.** *Methods of generation signals in transmitters of perspective navigation systems* ..... 25

**System analysis and control**

**Polyak M.D.** *A stochastic artificial neural network model for pattern recognition* ..... 33

**Solovjev D.S., Litovka Yu.V.** *Generating galvanic covering thickness distribution with better uniformity* ..... 39

**Nesterov S.A**. *Data mining in a database of the antivirus protection management server* ..... 44

**Masyuk A.A., Saradgishvili S.E.** *Theme categorization resources in the content filtering* ..... 50

**Brunarskiy P.N.** *Learning mobile robot for path motion with complex constraints* ..... 57

**Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies**

**Bronshtein E.M., Gindullin R.V.** *On one class of routing problems* ..... 63

**Maslovskaya A.G.** *The use of variational principles for computer simulation of ferroelectric domain boundary dynamics in the temperature gradient field* ..... 68

**Gonchar I.V., Paderno P.I.** *Ergonomic reengineering management of workplace* ..... 75

**Electronics, electronic equipment material production technologies**

**Morozov D.V., Yenuchenko M.S.** *Digital-to-analog converters with unary and segmented architectures* ..... 81

**Morozov D.V., Budanov D.O.** *Encoder of thermometric code to straight binary code* ..... 87

**Management in social and economic systems**

**Kupriyanov Yu.V., Taratoukhine V.V.** *Formalized approach for managing the organizational transformation in the course of deploying an enterprise information system* ..... 93

**Robotics and Mechatronics**

**Lopota A.V., Yurevich E.I.** *Stages and development prospects of robotic systems design modular principle* ..... 98

**Polovko S.A., Shubin P.K., Yudin V.I.** *A conceptual issues robotization marine engineering* 104

**Gradovtsev A.A., Kondratyev A.S., Lopota A.V.** *Robotic systems for prospective space infrastructure functions support* ..... 111

**Vasilyev I.A., Polovko S.A., Smirnova E.Yu.** *A group of mobile robot organization for special robotics problems* ..... 119

**Vasiliev A.V.** *Development and classification principles of ground mobile robot's and planet rover's chassis* ..... 124

**Ivanov A.A., Shmakov O.A., Demidov D.A.** *An experimental study of snake robot «ZMEELOC-3»* ..... 132

**Rabinovich B.A., Yurevich E.I.** *Systems for measurement and control of gaseous and liquid media parameters on board of space vehicles* ..... 139

**Gryaznov N.A., Lopota A.V., Sosnov E.N.** *Complex approach to solving tasks of medical robotics* ..... 144

**Senchik K.Yu., Kharlamov V.V.** *Prospects of creating miniature mechatronic devices for support of blood motion in human body at extreme situations* ..... 148

**Reznik O.N., Skvortsov A.E., Reznik A.O.** *Conservation of isolated donor organ viability by apparatus hemoperfusion* ..... 151

*List of authors* ..... 155

УДК 004.75:004.657

*Т.А. Медведев, И.В. Стручков*
*Санкт-Петербург, Россия*

# АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО СЛОЯ ДОСТУПА К РЕЛЯЦИОННЫМ БАЗАМ ДАННЫХ ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМЫХ ГИБРИДНО-ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ

*T.A. Medvedev, I.V. Struchkov*
*St.-Petersburg, Russia*

# MIDDLEWARE ARCHITECTURE FOR RELATIONAL DATABASE ACCESS IN A SCALABLE HYBRID CLOUD SYSTEM

Рассмотрены возможные подходы к обеспечению масштабируемости реляционных СУБД в гибридно-облачной инфраструктуре. В качестве требований выступают: эффективное распределение данных при создании множественных копий виртуальных машин, миграция данных между частной и публичной инфраструктурами, обеспечение возможности автономного функционирования информационных систем при разрыве сетевого соединения между инфраструктурами и обеспечение контроля передаваемых данных через глобальную сеть. Предложен подход на основе расширения широко распространенной реляционной модели данных, а также архитектура программного слоя доступа к данным.

РЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ДАННЫХ. ГИБРИДНО-ОБЛАЧНАЯ СИСТЕМА. МАСШТАБИРУЕМОСТЬ. КОНТРОЛЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.

The problem of relational DBMS scalability in a hybrid cloud infrastructure is investigated with respect to the following requirements: efficient data distribution when multiple virtual machine instances are run in the cloud, data migration between public and private cloud infrastructures, offline availability of hybrid cloud information services on network failure, data transfer control policies in the global network.

RELATIONAL DBMS. DATA DISTRIBUTION AND MIGRATION. HYBRID CLOUD SYSTEM. SCALABILITY. DATA TRANSFER CONTROL POLICY.

Технология облачных вычислений основывается на использовании виртуальных арендуемых вычислительных средств, предоставляемых по требованию. Благодаря тому, что в облачных технологиях ресурсы выделяются в кратчайшие сроки и в условно неограниченном объеме, возможен существенный шаг вперед в части обеспечения важнейших показателей качества современных информационных систем: масштабируемости и надежности. Это достигается путем своевременного автоматического подключения к системе новых вычислительных ресурсов в виде типовых виртуальных машин в случаях нехватки вычислительной мощности или выхода из строя каких-либо компонентов системы.

Появляющиеся в последнее время *гибридно-облачные технологии* позволяют размещать часть ресурсов в публичной облачной инфраструктуре, оставляя часть ресурсов в частной инфраструктуре организации. Такой подход позволяет повысить надежность, безопасность и масштабируемость информационных сервисов, сохраняя возможность использовать имеющиеся собственные ресурсы и прибегать к аренде

дополнительных ресурсов только при необходимости.

Имеющиеся технологии дают возможность масштабировать программные сервисы в облачной инфраструктуре путем создания множества копий идентичных программных компонентов. Один из способов реализации такого подхода описан в [1]. Данный способ позволяет осуществлять перенос компонентов программного обеспечения (ПО) между облачной инфраструктурой и собственными ресурсами предприятия, централизованное администрирование программных компонентов. Тем не менее недостаточно внимания уделено вопросу перераспределения данных при масштабировании сервисов. В отличие от программных компонентов, данные не могут быть механически размножены при масштабировании – остаются проблемы обеспечения целостности множества копий данных. В случае применения гибридно-облачных технологий дополнительную сложность создает тот факт, что данные могут храниться либо в локальной сети организации, либо в облачной инфраструктуре, либо в двух этих местах одновременно, разделяемые относительно медленным и слабо защищенным интернет-каналом.

Существует несколько возможных вариантов перераспределения данных при масштабировании, которые будут рассматриваться на примере баз данных (БД) как самого распространенного способа хранения данных для программных сервисов.

1. Репликация БД – создание множества идентичных копий БД. В этом случае встает вопрос синхронизации и поддержания непротиворечивого состояния всех копий данных.

2. Распределенное хранение (шардинг – sharding) – каждый элемент распределенной системы хранит свою собственную уникальную часть данных, которая определяется значением заданного параметра распределения. В этом случае появляется вопрос поиска и извлечения информации из распределенного хранилища.

3. Распределенное хранение с дублированием – каждый элемент распределенной системы хранит часть данных, которая не обязательно является уникальной. Данный вариант наиболее универсальный, однако в этом случае требуется решать обе задачи, указанные выше.

Цель данной статьи – обоснование подхода и описание архитектуры программного сервиса для повышения масштабируемости гибридно-облачных систем за счет эффективного распределения данных, миграции данных между частной и публичной инфраструктурами, обеспечения возможности автономного функционирования информационных систем при разрыве сетевого соединения между инфраструктурами, обеспечения контроля передаваемых данных через глобальную сеть на основе политик, задаваемых пользователем. При этом существенным требованием к разрабатываемому подходу является возможность использования имеющегося ПО без необходимости внесения существенных изменений.

**Анализ существующих решений**

Сервис Relational Cloud [2] является реализацией реляционной СУБД в облачной инфраструктуре. Эффективная работа в многопользовательском режиме, обеспечивающая хорошую масштабируемость, достигается за счет использования централизованного сбора статистики и принятия решений о переносе и/или репликации логических БД между серверами СУБД. Использование разбиения запросов между несколькими узлами позволяет эффективно выполнять запросы, для которых не хватает ресурсов одного узла. Безопасность реализуется за счет шифрования данных. Сервис не предполагает возможность использования в гибридно-облачной инфраструктуре и не предполагает контроля передаваемых данных через глобальную сеть.

Система хранения Cloudy [3] представляет собой настраиваемую распределенную среду, в которой можно задать интерфейс обращения к данным и механизм их хранения. Реализация основана на использовании предложенной модели представления данных, позволяющей единообразно описывать как запросы, так и результаты. Модульная архитектура позволяет настроить систему хранения под нужды пользователя. Каждый модуль реализует три базовые операции: чтение, добавление и удаление. Масштабируемость данных ограничена, поскольку не рассматривается вариант сложных запросов, которые не могут быть выполнены на одном узле. Также не рассматривается выполнение запросов, включающих данные из разных физических хранилищ. В системе не описаны механизмы защиты данных

и не предполагается использование в гибридно-облачной инфраструктуре.

Система HadoopDB [4], разработанная в Йельском университете для выполнения запросов в хранилище данных (Data Warehouse), реализует механизм разделения запросов для уменьшения используемых ресурсов. Предлагается несколько техник оптимизации, с помощью которых можно эффективнее использовать имеющиеся ресурсы на узлах хранения для выполнения больших запросов. Однако идеология Data Warehousing предполагает эффективное распределенное чтение данных из различных источников, но не предполагает запись в эти источники.

Базы данных класса NoSQL [5], такие, как Hadoop, MongoDB, CouchDB, проектировались в расчете на использование в облачной инфраструктуре и имеют существенно более высокую масштабируемость по сравнению с реляционными БД. В то же время они ориентированы на работу в условиях интенсивных операций чтения, поэтому проигрывают в производительности, когда более интенсивными являются операции записи, и не обеспечивают ACID свойств, характерных для реляционных СУБД. Обычно в них реализован механизм миграции между облачными инфраструктурами и они могут обеспечивать автономную работу при потере соединения. Тем не менее в них нет механизмов контроля передачи данных через глобальную сеть. Наиболее существенный недостаток такого класса БД – необходимость изменения имеющегося ПО, ориентированного на реляционную модель данных.

### Постановка задачи

По проведенному анализу можно сделать вывод, что в данный момент ни одно из существующих решений не позволяет полностью достичь поставленных целей. В связи с этим сформулируем более подробно задачи, которые требуется решить.

**Масштабируемость гибридно-облачных СУБД.** Отсутствие эффективных механизмов распределения данных является существенным ограничением масштабируемости информационной системы в целом. Чтобы получить преимущество использования облачной и тем более гибридно-облачной инфраструктуры, необходимо обеспечить механизм доступа к данным, который допускал бы гибкое перераспределение данных при масштабировании системы с возможностью создания нескольких пересекающихся копий данных, обеспечивая синхронизацию данных, эффективный поиск, возможность разбиения сложных запросов при обращении к ним.

Базы данных класса NoSQL удовлетворяют поставленному требованию, тем не менее при интенсивной работе с большим количеством операций записи они проигрывают в эффективности по сравнению с традиционными реляционными БД и не обеспечивают ACID свойств, традиционных для реляционных СУБД [6]. Система Cloudy не позволяет разбивать запросы, что делает невозможным выполнение запросов, относящихся к данным на разных физических узлах. Сервис Relational Cloud наиболее полно решает задачу, но не предоставляет возможности использования в гибридно-облачной инфраструктуре.

**Синхронизация данных в публичной и частной инфраструктурах.** Для эффективной работы системы в гибридно-облачной инфраструктуре необходимо иметь копии часто используемых данных в обеих инфраструктурах. При этом требуется обеспечить возможность автоматической синхронизации копий данных и обеспечения их непротиворечивого состояния.

**Способность автономного функционирования без подключения к сети Интернет.** Требуется организовать доступ к данным таким образом, чтобы при временном разрыве соединения между публичной и частной инфраструктурами работоспособность информационных систем сохранялась, возможно, с некоторыми ограничениями. При восстановлении соединения работоспособность должна полностью восстанавливаться.

**Контроль передачи данных через глобальную сеть.** Многие информационные системы, в которых имеются конфиденциальные данные, не используют облачные и гибридно-облачные инфраструктуры, поскольку имеющиеся технологии не позволяют обеспечить требуемый уровень безопасности. В частности, при использовании гибридно-облачной инфраструктуры требуется обеспечить контроль передачи конфиденциальных данных в сеть Интернет на основе задаваемых политик, чтобы требуемый уровень безопас-

ности был обеспечен (например, при работе с персональными данными). Имеющиеся системы в основном обеспечивают безопасность данных с помощью их шифрования, без возможности ограничения их передачи.

Требуется создать модель политик безопасности передачи данных, которая позволит задавать правила допустимости передачи определенных данных между инфраструктурами.

**Совместимость с имеющимся программным обеспечением.** Система должна обеспечивать работу имеющегося ПО без внесения существенных изменений. Данное требование удовлетворяется использованием промежуточного слоя доступа к данным, который будет обеспечивать привычный интерфейс для имеющегося ПО и в то же время удовлетворять требуемым свойствам.

### Расширенная модель представления запросов к СУБД

В качестве основы для разрабатываемой математической модели данных используется традиционная реляционная модель. Данная модель является наиболее распространенной. Кроме того, набирающая в последнее время популярность объектная модель данных в большинстве случаев также сводится в реляционной модели через механизмы объектно-реляционного отображения (Object-Relational Mapping – ORM). Таким образом, выбор реляционной модели данных в наибольшей степени отвечает поставленному требованию сохранения совместимости с имеющимся ПО.

**Условные обозначения.** Приведенные ниже математические объекты и их обозначения соответствуют общепринятой реляционной модели данных:

4) отношение (таблица) $R(A_1, A_2, ..., A_n)$;

5) атрибут отношения (столбец данных) $A_i \in A$;

6) кортеж (строка данных) $(a_1, a_2, ..., a_n)$, где $a_1 \in A_1, a_2 \in A_2, \ldots, a_n \in A_n$;

7) условие выборки – предикат атрибута отношения $cw(A_i) \in A_i$;

8) условие соединения атрибутов отношений $cj \in C$; $cj = <A_i, A_j, \text{condition}>$, причем $A_i$ и $A_j$ – атрибуты разных отношений

**Традиционная модель.** Традиционные реляционные СУБД исходят из предположения, что все данные хранятся централизованно. По этой причине *запрос данных* $z_{t1} \in Z_t$, где $Z_t$ – это множество всех возможных запросов данных, представляет собой кортеж $(A_1, A_2, ..., A_k, cw_1, cw_2, ..., cw_l, cj_1, cj_2, ..., cj_l)$, который содержит запрашиваемые столбцы, их условия выборки и соединения, поскольку остальные параметры запроса не важны с точки зрения получения данных. Кроме этого СУБД имеет информацию об учетной записи пользователя, сделавшего данный запрос, что реализует базовый механизм безопасности доступа к данным.

В случае использования шардинга определением места хранения запрашиваемых данных занимается прикладное ПО. Таким образом, запрос данных $z_{t2}$ в этом случае представляет собой кортеж, идентичный указанному выше, с дополнительным ограничением: все столбцы данных $Ai$ должны относиться к одному источнику данных. Сложные запросы, требующие объединения результатов из разных источников, не могут быть выполнены стандартными средствами.

На уровне контроля доступа к данным при обработке запросов проверяются только права пользователя в отношении данных, с которыми он работает, что не позволяет контролировать передачу этих данных через глобальные сети.

Таким образом, для эффективной работы с данными, хранящимися распределенно, требуется расширить язык представления запросов.

**Предлагаемое расширение традиционной модели.** Предлагаемая модель обеспечивает возможность маршрутизации запросов в гибридно-облачной среде с учетом распределенного хранения данных и возможность контроля передачи запрашиваемых данных через глобальную сеть.

С этой целью в кортеж запроса данных добавлена информация о сетевом узле, с которого поступил запрос данных (*номер узла* $n \in N$): $z = (A_1, A_2, ..., A_k, cw_1, cw_2, ..., cw_l, cj_1, cj_2, ..., cj_l, n) \in Z$, где $Z$ – это множество всех возможных запросов данных, расширенных номером узла, что позволяет отслеживать передачу запрашиваемых и вспомогательных данных в рамках запроса.

Кроме этого в модель добавлены такие объекты, как *распределение хранящихся данных* $s = (A_i, cw_i, N_1) \in S$, где $A_i \in A$, $N_1 \subset N$, и *политика*

*допустимого перемещения данных* $p = (A_i, cw_i, n) \in P$, где $A_i \in A$, $n \in N$. С помощью этих объектов можно проверить доступность для передачи запрашивающему узлу данных запроса, а также провести разбиение и распределенное выполнение запроса.

Сформированный указанным выше способом расширенный запрос направляется в промежуточный слой доступа к данным, где происходит поиск данных, проверка доступности и маршрутизация на основе заданного распределения хранящихся данных. Если данные распределены так, что один узел не может выполнить весь запрос целиком, промежуточный слой разбивает запрос таким образом, чтобы он был выполнен наиболее эффективно.

Пример. Исходный запрос от узла $n$: $z = (A_1, A_2, ..., A_k, cw_1, cw_2, ..., cw_l, cj_1, cj_2, ..., cj_l, n)$.

Распределение данных: $(A_1, ..., A_i, cw_1, ..., cw_j, n_1)$; $(A_{i+1}, ..., A_k, cw_j, ..., cw_l, n_2)$.

Итоговые запросы:

$z1 = (A_1, ..., A_i, cw_1, ..., cw_j, cj_1, ..., cj_t, n)$ для отправки на узел $n_1$;

$z2 = (A_{i+1}, ..., A_k, cw_{j+1}, ..., cw_l, cj_{t+1}, ..., cj_l, n)$ для отправки на узел $n_2$.

Кроме того, применяются политики перемещения данных к запрашивающему узлу из мест хранения. Процедура применения политик отличается для данных разных типов:

1. *Данные результата запроса* обязательно будут переданы источнику запроса, поэтому проверка необходима.

2. *Данные соединения* могут быть переданы на узел сборки или источник запроса, поэтому проверка также необходима.

3. *Данные выборки* не передаются, поскольку участвуют в выборке на узле хранения, поэтому проверка не требуется.

Пример. Предположим, что узел $n$ сформировал запрос: $z = (A_1, A_2, ..., A_k, cw_1, cw_2, ..., cw_l, cj_1, cj_2, ..., cj_l, n)$.

В этом случае:

данные результата запроса – $(A_1, A_2, ..., A_k, cw_1, cw_2, ..., cw_k)$;

данные соединения – $(cj_1, cj_m, ..., cj_l)$;

данные выборки – $(cw_1, cw_2, ..., cw_l) \setminus (A_1, A_2, ..., A_k)$.

В результате проверки формируется список столбцов $A_i : \forall\, i\ A_i \subset (z \cap s = (A_i, cw_i, n_j) \cap p = (A_i, cw_i, n))$.

Если полученный список $A_i$ содержит все столбцы, участвующие в запросе, значит запрос может быть выполнен. Иначе запрос выполнить невозможно.

$z \cap (A_i) = z \Rightarrow$ запрос удовлетворяет политикам.

$z \cap (A_i) \neq z \Rightarrow$ запрос нарушает одну или более политик.

### Архитектура и принципы функционирования масштабируемого слоя доступа к данным гибридно-облачной платформы

В статье [7] предложена архитектура для распределенного хранения данных в одноранговой сети. Ее отличительной особенностью является групповая организация узлов с различными характеристиками для достижения требуемых свойств хранения. Также одноранговые сети предоставляют эффективные механизмы поиска по

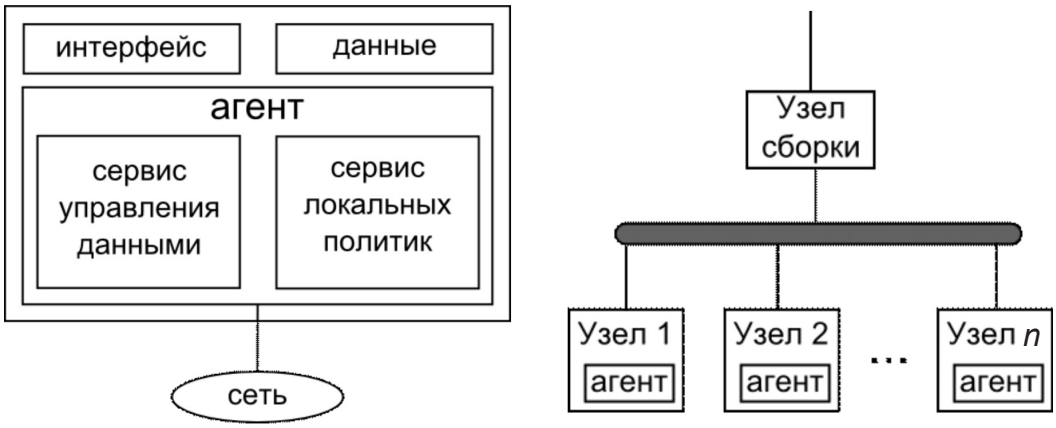



Рис. 1. Архитектура узла системы и пример группы узлов с узлом сборки

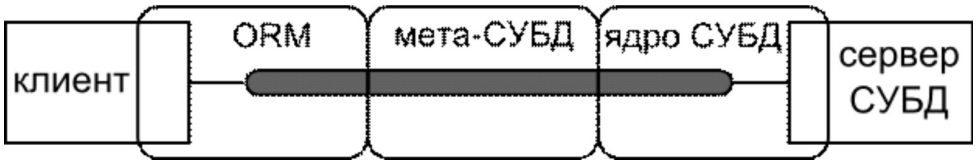



Рис. 2. Различные уровни встраивания промежуточного слоя доступа к данным

распределенным данным.

В нашем случае имеются две группы узлов, обладающие разными свойствами: ресурсы публичной и частной инфраструктур. Таким образом, мы можем использовать предложенную ранее архитектуру, чтобы учитывать гетерогенность этих групп узлов.

На рис. 1 представлена архитектура ПО узла системы и пример группы узлов с узлом сборки, о котором будет сказано позже.

На каждом узле имеется программный агент, с помощью которого реализуется промежуточный слой доступа к данным. Агент хранит информацию о том, какие данные хранятся на узле и политики безопасности, связанные с этими данными.

С целью повышения масштабируемости в сети может иметься *узел сборки*, который используется для связи с другими сетями, по аналогии с подходом, предложенным в [7]. Под сетью будем подразумевать либо набор узлов без узла сборки, либо узел сборки и связанные с ним узлы. Каждый узел сети может быть как самостоятельным узлом, хранящим данные, так и узлом сборки другой сети, через который происходит доступ к данным этой сети. Узел сборки хранит информацию о данных, имеющихся в сети, и политики безопасности для передачи этих данных в другие сети.

При необходимости получения данных с других узлов агент ищет узлы сети, которые могут предоставить эти данные. Если в сети данные не были найдены, запрос направляется на узел сборки, при его наличии. Узел сборки повторяет процедуру поиска в сети более высокого уровня.

В корне иерархии сетей находится сеть без узла сборки, и если в ней данные не были найдены, запрос выполнить невозможно.

### Поддержка имеющегося программного обеспечения

С целью сохранения обратной совместимости с имеющимся ПО, предлагается реализовать механизм доступа к данным в гибридно-облачной системе в виде промежуточного слоя ПО. При работе с СУБД имеется несколько возможных вариантов встраивания промежуточного слоя ПО (рис. 2).

Уровень ORM (Object-relational mapping – Объектно-реляционное отображение) предполагает встраивание на стороне клиента в процессе преобразования объектного запроса в реляционный. Такой вариант потребует существенного изменения ПО, написанного без использования ORM.

Вариант встраивания на уровне ядра СУБД требует учета особенностей внутреннего представления запросов и данных, а также принципов работы каждой отдельной СУБД.

Мета-СУБД представляет собой абстрактную СУБД, являющуюся посредником между клиентским ПО и основной СУБД. Она получает запросы от клиентского ПО в исходном виде, запрашивает данные у основной СУБД и возвращает клиенту. В большинстве случаев использование такого подхода не потребует внесения изменений в имеющееся ПО, т. к. сохраняется стандартный программный интерфейс реляционной СУБД. Таким образом, требование совместимости с имеющимся ПО без внесения существенных изменений наилучшим образом обеспечивается вариантом с мета-СУБД.

### Результаты исследования

Повышение масштабируемости гибридно-облачных СУБД достигнуто за счет использования модели представления запросов, дополняющей реляционную модель характеристиками распределения данных по множеству узлов. Это позволяет хранить копии данных на различных узлах, выполнять эффективный поиск методами одноранговых сетей. Наличие условий соединения позволяет разделять сложные запросы и выполнять их части на разных узлах.

Синхронизация данных в публичной и частной инфраструктурах обеспечивается за счет

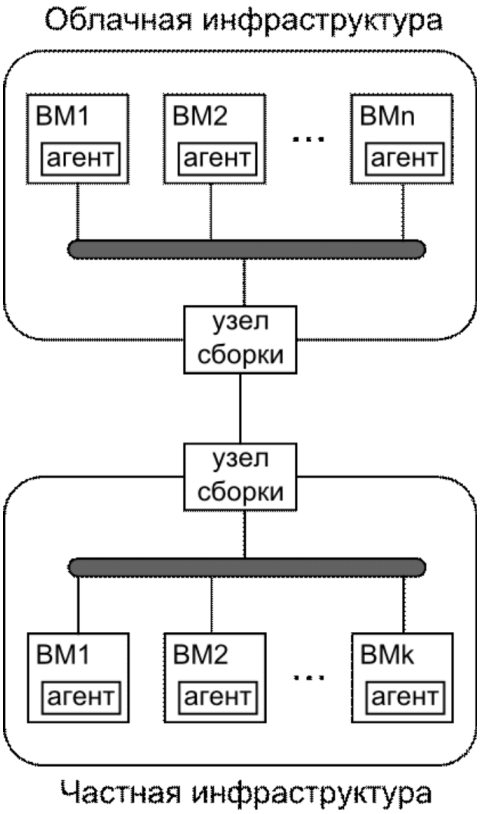



Рис. 3. Пример архитектуры системы

применения слоя мета-СУБД и распределенной архитектуры ПО на основе программных агентов. На рис. 3 представлен пример архитектуры, описанной выше.

Программные агенты выступают в качестве посредников в любой операции запроса или модификации данных за счет слоя мета-СУБД. Таким образом, агенты способны формировать снимки изменений и рассылать их другим агентам по аналогии с подходами, используемыми в одноранговых сетях [7].

Автономное функционирование без подключения к сети Интернет обеспечено за счет использования абстракции, когда другие сети воспринимаются как обычные узлы. В этом случае разрыв соединения между сегментами сети воспринимается аналогично отключению одного узла. Оба сегмента сети могут продолжать функционировать автономно с некоторыми ограничениями:

невозможность использования данных, которые стали недоступны;

кэшированные данные отключенного сегмента сети становятся доступны только для чтения.

После восстановления соединения производится синхронизация данных, и работоспособность системы полностью восстанавливается.

Обеспечен контроль передачи данных через глобальную сеть за счет применения политик допустимости передачи в слое доступа к данным. Применение политик – это процедура определения допустимости передачи данных узла на запрашивающий узел. Проверка считается успешной, если допустимо передать все данные, которые запросил узел.

В статье проанализированы возможные подходы к обеспечению масштабируемости реляционных СУБД в гибридно-облачной инфраструктуре и сформулированы цели и задачи развития существующих методов для достижения гибкого распределения данных, сочетающего разделение и дублирование данных, а также введение контроля данных, передаваемых между отдельными инфраструктурами, на основе политик. При этом важным требованием к создаваемому подходу является обеспечение возможности использования существующего ПО без существенных модификаций.

Предложен подход на основе расширения широко распространенной реляционной модели данных, а также архитектура программного слоя доступа к данным, которые позволяют достичь поставленных целей. В качестве дальнейшего развития подхода предполагается создание действующего прототипа на основе предложенной архитектуры и проведение экспериментального исследования свойств полученной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стручков, И.В.** Способ установки, настройки, администрирования и резервного копирования программного обеспечения: Патент РФ № 2445686 [Текст] / И.В. Стручков. –Дата приоритета 21.01.2010.

2. **Curino, Carlo.** Relational Cloud: A Database-as-a-Service for the Cloud [Электронный ресурс] / Carlo Curino [et al.] // Biennial Conf. on Innovative Data Systems Research, CIDR 2011. –Jan. 9-12, 2011. –Asilomar, California.

3. **Donald, Kossmann.** Cloudy: A Modular Cloud Storage System [Электронный ресурс] / Donald Kossmann [et al.] // Proc. VLDB Endow. –Sept. 2010. –Vol. 3.

4. **Bajda-Pawlikowski, K.** Efficient processing of data warehousing queries in a split execution environment [Электронный ресурс] / K. Bajda-Pawlikowski [et al.] // Proc. of the 2011 International conf. on Management of data (SIGMOD'11) – ACM, 2011. –P. 1165–1176.

5. **Strauch, C.** NoSQL Databases [Электронный ресурс] / C. Strauch. –Режим доступа: https://oak.cs.ucla.edu/cs144/handouts/nosqldbs.pdf

6. **Arora, I.** Cloud Databases: A Paradigm Shift in Databases [Text] / I. Arora, A. Gupta // International J. of Computer Science Issues. –July 2012. –Vol. 9. –Iss. 4. –№ 3. –P. 77–83.

7. **Медведев, Т.А.** Распределенная система резервного копирования в гибридно-облачной среде [Текст] / Т.А. Медведев, И.В. Стручков // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сб. науч. тр. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

УДК 621.391;621.394/396;654.1

*В.Ю. Садовников*
*Санкт-Петербург, Россия*

# СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ СЕТЕЙ ДОСТУПА

*V.Yu. Sadovnikov*
*St.-Petersburg, Russia*

# COMPARISON OF ALGORITHMS FOR THE RESOURCE DISTRIBUTION BETWEEN ACCESS NETWORKS

Продолжение статьи «Математическая модель доступа к FMC-услугам с учетом равномерной балансировки нагрузки между сетями доступа при миграции абонента». Представлено сравнение результатов работы алгоритмов распределения и балансировки нагрузки с алгоритмами, базирующимися на алгоритме FFD (First-Fit Decreasing).

СЕТЕВОЙ РЕСУРС. НАГРУЗКА. ТРАФИК. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ. АЛГОРИТМЫ. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ.

The article is continuation of article «Mathematical model of access to FMC services considering to uniform distribution of traffic load between access networks and subscriber migration» and presents comparison of results of algorithms that perform traffic load distribution and balancing, and algorithms based on FFD (First-Fit Decreasing) method.

NETWORK RESOURCE. LOAD. TRAFFIC. TRAFFIC CAPACITY. ALGORIGTHMS. INCREASE OF EFFICIENCY.

В статье [1] представлены алгоритмы, позволяющие распределять и перераспределять услуги между сетями доступа.

В настоящей статье проводится сравнение результата работы данных алгоритмов с алгоритмами распределения запрашиваемого ресурса между сетями доступа, предложенными в [2], которые базируются на алгоритме FFD (First-Fit Decreasing).

Алгоритм FFD [3] решает задачу упаковки в контейнеры, где объекты предопределенной формы упаковываются в конечное число контейнеров предопределенной величины таким способом, чтобы число использованных контейнеров было наименьшим или количество, или объем упаковываемых объектов были наибольшими. FFD всегда помещает самый большой элемент в списке в контейнер с наименьшим номером, имеющий достаточное место для этого элемента. В решении задачи распределения ресурсов сетей доступа контейнеры – это пропускные полосы сетей доступа, а объекты – это величины ширины полосы пропускания запрашиваемой услуги. FFD направляет заявку, требующую наибольшую полосу пропускания, в сеть с наименьшим номером, в которой имеется достаточный ресурс.

Авторы [2] изменяют порядок обработки заявок в очереди и алгоритм по принятию решения о выборе сети доступа (FFD), учитывая дополнительные критерии:

предпочтительность выбора определенной сети доступа (строгое предпочтение, приоритет отдельной сети по сравнению с остальными, отсутствие приоритета);

возможность дробления запрашиваемой полосы пропускания на части;

минимизацию энергозатрат мобильными устройствами;

возможность перераспределения потоков данных между сетями доступа.

Предложены четыре варианта алгоритма, каждый из которых дополняет предыдущий, учитывая один новый из ранее перечисленных критериев. Эти алгоритмы выдают наиболее близкие к оптимальным результаты по энергопотреблению и пользовательским предпочтениям. Поскольку результаты симуляции работы каждого алгоритма несущественно отличаются друг от друга, рассмотрим один из них – First Fit Decreasing with Substitution (FFDwS) – выбор первой подходящей сети с подменой.

FFDwS, в отличие от FFD, обрабатывает заявки в очереди в другом порядке. Приоретизация представляет собой сортировку заявок по двум параметрам в порядке их убывания: сначала учитывается предпочтительность выбора определенной сети доступа, после чего – требуемая заявкой пропускная ширина полосы. Под подменой понимается перемещение ресурса, выделенного для ранее обработанной заявки, в другую сеть (если это возможно) с целью высвобождения полосы пропускания под ресурс, необходимый для удовлетворения поступившей на обработку заявки, предпочитающей эту сеть.

Таблица 1

**Характеристики пуассоновских процессов**

| Процесс | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1/λ, с | 20 | 16 | 12 | 8 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 1/μ, с | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |

Однако не всегда запрошенная полоса пропускания может быть использована полностью, что означает неэффективность применения алгоритмов, базирующихся на FFD. В качестве примера можно привести ситуацию, когда сеть выделила пользователям большой объем ресурсов, но при этом само использование этих ресурсов имеет малую интенсивность, т. е. свободного ресурса не остается, а сеть простаивает в бездействии.

Таблица 2

**Характеристики классов услуг по типам трафика**

| Класс услуги | Тип трафика | Характеристики запрашиваемой полосы пропускания, кбит/с | | | Нормальная нагрузка на сеть | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | min | max | Шаг | Bluetooth | 802.11b | 802.11a | UMTS | GPRS |
| Речь | G.711 | 64 | 128 | 64 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,9 |
| | G.729 | 8 | 16 | 8 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,9 |
| Аудио | AAC | 128 | 176 | 8 | 0,75 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,9 |
| | MP3-CBR | 64 | 320 | 16 | 0,8 | 0,65 | 0,65 | 0,9 | 0,95 |
| | MP3-VBR | 224 | 288 | 16 | 0,75 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,8 |
| HD-видео H.264 | 176×144 | 150 | 200 | 25 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| | 320×240 | 300 | 500 | 50 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| | 640×480 | 1000 | 2000 | 50 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| | 1280×720 | 5000 | 6000 | 250 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 1,0 |
| | 1920×1080 | 7000 | 9000 | 250 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 1,0 |
| P2P | Torrent | 64 | 10000 | 1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,6 |
| WEB | HTTP HTTPS | 64 | 256 | 4 | 0,25 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,2 |
| IM | IM | 8 | 64 | 1 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,4 |
| Почта | SMTP POP3 | 64 | 512 | 8 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 1,0 |
| Трафик | Высокая нагрузка | 64 | 10000 | 1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | Средняя нагрузка | 64 | 10000 | 1 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| | Слабая нагрузка | 64 | 10000 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | Очень слабая нагрузка | 64 | 10000 | 1 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |

Как следствие, для разработанных алгоритмов, представленных в [1], были взяты условия проведения эксперимента из [2]. Симуляция предполагает наличие пяти сетей доступа (Bluetooth, IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, UMTS и GPRS), каждая из которых характеризуется пропускной способностью, задержками и параметрами энергосбережения. При этом выделение ресурса сетей моделируется девятью пуассоновскими процессами со своими значениями интенсивностей поступления $\lambda$ и обслуживания $\mu$ заявок (см. табл. 1).

Учитывается, что каждая заявка может включать в себя запрос от одного до трех классов потоков данных со случайной шириной полосы доступа, с различными предпочтениями и приоритетами сетей доступа. В эксперименте, описанном в [2], классификации услуг нет, т. е. выделяемая полоса доступа загружена полностью, что не всегда верно. Разработанные алгоритмы распределения и балансировки нагрузки [1] учитывают в своих исходных данных классы услуг и нагрузку на сеть, создаваемую каждым классом, что позволяет избежать лишнего простаивания ресурса сети.

В табл. 2 сведены характеристики запрашиваемых полос пропускания и нормальных нагрузок на сеть в соответствии с классами услуг и типами трафика, используемые исследуемыми алгоритмами распределения и балансировки нагрузки. Под нормальной нагрузкой понимается нагрузка, создаваемая трафиком услуги на сеть при условии полного занятия услугой всей полосы пропускания сети.

На интервале симуляции, равном одному часу, измерялись (как по отдельному пуассоновскому процессу, так и в целом) следующие показатели:

количество обслуженных заявок;

количество необслуженных заявок;

суммарный объем выделенной полосы доступа для обслуженных заявок;

суммарный объем отказанной полосы доступа для необслуженных заявок;

суммарное время использования ресурсов сети;

суммарный объем трафика (сумма произведений из ширины полосы пропускания на время ее занятия);

среднее время использования услуги;

средний объем трафика услуги.

Результат представлен на диаграммах (см. рисунок), позволяющих сравнить работу алгоритмов распределения и балансировки нагрузки, базирующихся на методе максимального элемента (ММЭ) с Random-алгоритмом (выбор случайной подходящей сети), FFD-алгоритмом и FFDwS-алгоритмом, изложенным в [2].

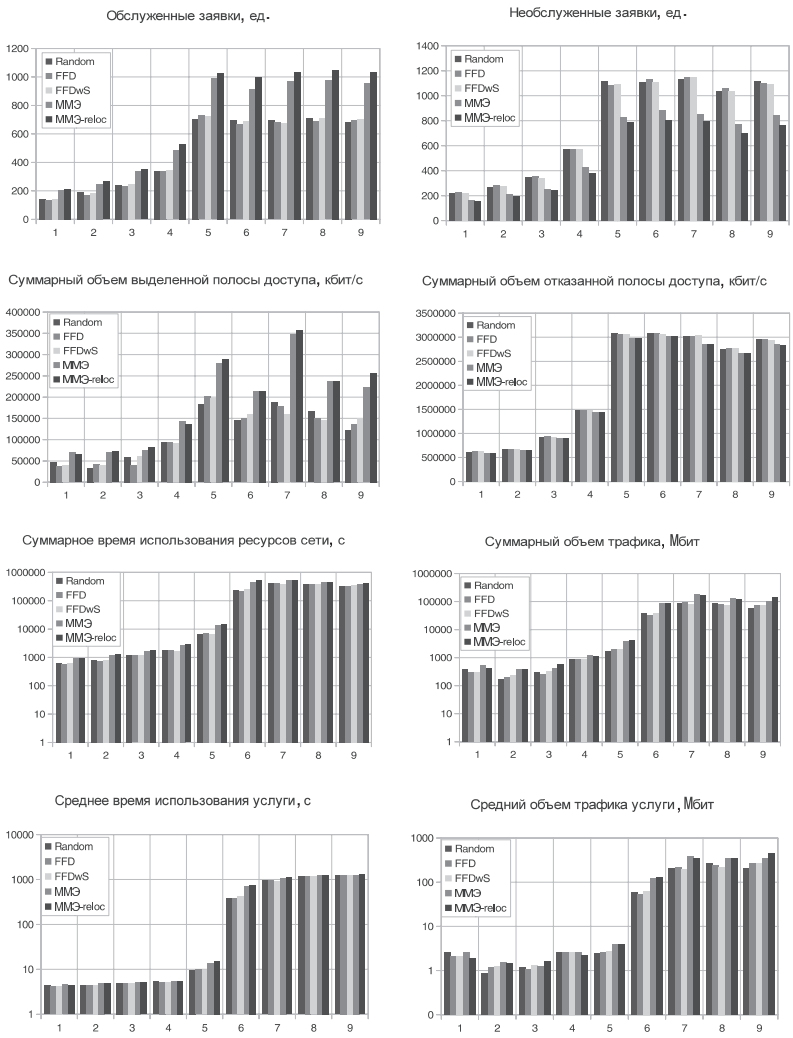
Из диаграмм видно, что исследуемые алгоритмы распределения (ММЭ) и балансировки нагрузки (ММЭ-reloc) между сетями доступа работают эффективнее алгоритмов, базирующихся на FFD.

В табл. 3 сведены величины относительного прироста названных выше показателей. По ним можно сделать вывод, что с помощью разработанных алгоритмов распределения и балансировки нагрузки повышение эффективности доступа к услугам на основе сетей Always Best Connected (ABC) составляет свыше 45 % в среднем по разным показателям. Отсюда следует что, базируясь на классе трафика, с помощью этих алгоритмов можно эффективнее распределять ресурсы сетей доступа между клиентами. Из табл. 3 также видно, насколько улучшаются показатели при работе алгоритма балансировки нагрузки в сочетании с алгоритмом распределения нагрузки (последний столбец): когда алгоритм распределения нагрузки не может выделить ресурс, алгоритм балансиров-

Таблица 3

**Относительный прирост показателей, %**

| Показатели | ММЭ/ Random | ММЭ-reloc/ Random | FFDwS/ FFD | ММЭ/ FFD | ММЭ-reloc/ FFD | ММЭ/ FFDwS | ММЭ-reloc/ FFDwS | ММЭ-reloc/ММЭ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обслуженные заявки | 38,1 | 47,6 | 1,9 | 40,0 | 49,7 | 37,4 | 46,9 | 6,9 |
| Необслуженные заявки | –24,2 | –30,3 | –1,2 | –24,9 | –30,9 | –24,0 | –30,1 | –8,0 |
| Суммарный объем выделенной полосы доступа | 59,9 | 64,6 | 1,1 | 61,3 | 65,9 | 59,5 | 64,1 | 2,9 |
| Суммарный объем отказанной полосы доступа | –3,3 | –3,6 | –0,1 | –3,4 | –3,6 | –3,3 | –3,6 | –0,3 |
| Суммарное время использования ресурсов сети | 31,0 | 39,3 | 2,6 | 32,1 | 40,4 | 28,8 | 36,8 | 6,3 |
| Суммарный объем трафика | 83,4 | 94,7 | –3,1 | 77,0 | 87,8 | 82,7 | 93,9 | 6,1 |
| Среднее время использования услуги | 6,4 | 8,4 | 0,8 | 5,7 | 7,7 | 4,8 | 6,8 | 1,9 |
| Средний объем трафика услуги | 48,9 | 51,5 | –4,8 | 41,6 | 44,1 | 48,7 | 51,4 | 1,8 |




Диаграммы с результатами симуляции

ки нагрузки перераспределяет ресурс и пытается его повторно выделить.

Таким образом, впервые продемонстрирован эффективный доступ к инфокоммуникационным услугам, базирующийся на алгоритмах, которые распределяют и балансируют ресурсы разнородных сетей доступа, в совокупности образующих сеть Always Best Connected (ABC), основываясь на нагрузке, создаваемой запрашиваемыми услугами на эти сети доступа:

разработанный алгоритм эффективного распределения общего ресурса сетей доступа с перекрывающимися зонами покрытия отличается тем, что при распределении сетевого ресурса учитывается нагрузка, создаваемая на сети доступа, а не запрашиваемая услугой ширина полосы пропускания;

разработанный алгоритм балансировки используемых ресурсов сетей доступа с перекрывающимися зонами покрытия обеспечивает равномерную загрузку сетей доступа услугами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Садовников, В.Ю.** Математическая модель доступа к FMC-услугам с учетом равномерной балансировки нагрузки между сетями доступа при миграции абонента [Текст]/ В.Ю. Садовников.

2. **Bo, Xing.** Multi-constraint dynamic access selection in Always Best Connected networks [Text] / Xing Bo, Nalini Venkatausbramanian. –Donald Bren School of Information and Computer Sciencies, Univercity of California.

3. **Guochuan, Z.** The FFD Algorithm for the Bin Packing Problem with Kernel Items [Text] / Z. Guochuan, Y. Enyu. –Department of Applied Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, 1998.

УДК 621.396

*Н.А. Лобанов*
*Томск, Россия*

# АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ ПО ПОДНЕСУЩИМ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ OFDM СИГНАЛА

*N.A. Lobanov*
*Tomsk, Russia*

# ALLOCATION ALGORITHM FOR DATA SUBCARRIERS FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON OFDM SIGNAL

Предложен алгоритм адаптивного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим. Приведены результаты математического моделирования данного алгоритма в условиях релеевского частотно-селективного канала распространения. Произведено сравнение с алгоритмом Yu и случаем использования равномерного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим. Показана теоретическая эффективность использования предложенного алгоритма при его применении в системе связи WIMAX стандарта IEEE 802.16.

АДАПТИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ. АДАПТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ. OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING). СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ. БИТОВАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ.

We present an adaptive bit loading algorithm for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. Present algorithm use a blockwise allocation of modulation and power levels to the subcarriers with puncturing of «weak» subcarriers. The simulation results show the effectiveness of this algorithm for the case of random multipath Rayleigh channel.

ADAPTIVE MODULATION. ADAPTIVE POWER. OFDM. BIT RATE. BIT ERROR RATE (BER).

В системах связи 3G, 4G и цифрового телевидения (DVB) наиболее распространенной технологией передачи данных является мультиплексирование (уплотнение) с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [1]. Суть данной технологии состоит в том, чтобы разделять имеющуюся полосу частот на множество ортогональных подканалов (поднесущих). Формирование ортогональных поднесущих достигается за счет применения алгоритмов преобразования Фурье. Системы связи, основанные на применении данной технологии, эффективны при функционировании в условиях многолучевого распространения с частотно-селективными замираниями.

Примерами систем передачи с ортогональными поднесущими служат системы связи семейства WIMAX (IEEE 802.16) [2]. Стандарт, описывающий данные системы, предполагает равномерное распределение мощности, а также одинаковый индекс модуляции на каждой информационной поднесущей для одного абонента. Однако такой подход не является оптимальным с точки зрения достижимой скорости передачи данных при условии ограниченной излучаемой мощности. Выражение для пропускной способности неидеального линейного фильтрового канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) принадлежит Шеннону (1949 г.), а фундаментальная интерпретация этого результата сводится к тому, что мощность сигнала должна быть велика, когда канальное отношение сигнал/шум (ОСШ) велико, и она должна быть мала, когда ОСШ мало [3].

В системах, использующих OFDM, благодаря ортогональности поднесущих возможно изменять не только мощность по поднесущим, но и индекс

модуляции на каждой поднесущей. Таким образом, можно увеличивать скорость передачи, уменьшать передаваемую мощность и битовую вероятность ошибки (Bit Error Rate – BER). Алгоритмы адаптивного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим называются *алгоритмами битлоадинга*. Почти все алгоритмы битлоадинга предполагают точное знание канала передачи и исключают наличие межсимвольной интерференции.

В данной статье рассматриваются алгоритмы, направленные на увеличение скорости передачи, и предложена модификация. Наиболее известные алгоритмы, представленные в литературе, это алгоритм Hughes–Hartogs [4] и алгоритм Yu [5]. В соответствии с алгоритмом Hughes–Hartogs управление индексом модуляции и передаваемой мощностью производится на каждой поднесущей. Однако это требует большого количества служебной информации, передаваемой по обратному каналу связи, и больших вычислительных мощностей для его реализации. Также недостатком данного алгоритма является то, что он рассчитан только на квадратурную QAM модуляцию. В работе Yu предложен алгоритм, предполагающий равномерное распределение передаваемой мощности по поднесущим, что в значительной степени сокращает количество требуемой служебной информации. Суть алгоритма состоит в том, чтобы не использовать поднесущие с заведомо плохим отношением сигнал/шум, т. е. не тратить передаваемую мощность на данные поднесущие, а высвободившуюся мощность распределять по используемым поднесущим. В работе [6] проведено сравнение алгоритмов Hughes–Hartogs и Yu и показано, что для работы алгоритма Yu требуются значительно меньшие вычислительные ресурсы для достижения схожих результатов. Тем не менее данный алгоритм также требует передачи служебной информации по обратному каналу связи об индексе модуляции на каждой поднесущей, что усложняет его техническую реализацию. Следовательно, встает задача разработки эффективного алгоритма адаптивного распределения мощности и скорости передачи для систем связи, требующего небольшого количества информации, передаваемой по обратному каналу связи.

### Алгоритм битлоадинга

При разработке алгоритма битлоадинга, требующего минимального количества передаваемой служебной информации, следует учитывать структуру используемого символа. Представленные алгоритмы предполагают изменение индекса модуляции на каждой поднесущей, однако это требует либо точной информации о влиянии канала на каждую поднесущую, либо использование сложного адаптивного эквалайзера, не всегда являющегося эффективным. В предлагаемом алгоритме предполагается разбивать символ на несколько одинаковых блоков, по $n$ поднесущих в каждом. Например, в системе WIMAX пилотные поднесущие, по которым возможно произвести оценку канала, располагаются через каждые 25 информационных поднесущих. Следовательно, выбор модуляции следует делать на весь блок между пилотными поднесущими.

Идея предлагаемого алгоритма заключается в том, чтобы объединять соседние поднесущие по блокам из $n$ поднесущих, выбирая на блок один индекс модуляции. Если на всем блоке заведомо плохое ОСШ, то отключать весь блок и высвободившуюся энергию распределять по оставшимся блокам с поднесущими. Выбор модуляции на поднесущей (блоке) и выбор отключаемых поднесущих (блоков) производится согласно алгоритму Yu. Пошаговое описание предложенного алгоритма приведено ниже.

1. Разбить символ на $m$ блоков, где величина $m$ выбирается из условий распространения и структуры используемого символа.

2. Вычислить значение коэффициента передачи $H$ для каждого блока.

3. Отсортировать $H_k$ так, чтобы $|H_1| \geq |H_2| \ldots \geq |H_m|$.

4. Определить $l = m - 1$.

5. Вычислить $E_0 = P_{\text{Пср}}/k$, где $E_0$ – энергия на одну поднесущую; $P_{\text{Пср}}$ – имеющаяся в распоряжении средняя мощность передатчика; $k$ – количество поднесущих.

6. Вычислить $E'_0 = \dfrac{E_0 \cdot m}{l}$.

7. Если $\sigma^2 / H_{l+1} \geq E_0' + \sigma^2 / H_1$, тогда $l = l - 1$ и перейти к шагу 6, в противном случае перейти к шагу 8, где $\sigma^2$ – дисперсия шума.

8. Вычислить общий индекс модуляции на каждый блок: $b_i = round(\log_2(1 + \dfrac{E'_0 \cdot H_i}{\sigma^2}))$, где $i = 1 \ldots m$.

9. Установить количество бит $b$ на каждую поднесущую в соответствии с $b_{1+(n\cdot i)\ldots n+(n\cdot i)} = b_i$, где $i = 1 \ldots m$, $n = 1 \ldots k / m$.

### Результаты моделирования

В ходе моделирования проведено сравнение стандартной системы, использующей равномерное распределение мощности и модуляцию QPSK, а также системы с адаптивным распределением,

**Модели каналов для беспроводных систем связи**

| Модель | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ped_A | Задержка, нс | 0 | 110 | 190 | 410 | | | | | | |
| | Ослабление, дБ | 0 | –9,7 | –19,2 | –22,8 | | | | | | |
| Vech_B | Задержка, нс | 0 | 300 | 8900 | 12900 | 17100 | 20000 | | | | |
| | Ослабление, дБ | –2,5 | 0 | –12,8 | –10,0 | –25,2 | –16,0 | | | | |
| Typ_U | Задержка, нс | 0 | 217 | 512 | 514 | 517 | 674 | 882 | 1230 | 1287 | 1311 |
| | Ослабление, дБ | –5,7 | –7,6 | –10,1 | –10,2 | –10,2 | –11,5 | –13,4 | –16,3 | –16,9 | –17,1 |

использующей алгоритм Yu и предложенный модернизированный алгоритм с различной величиной разбиения на блоки. Для этого получены битовые вероятности ошибки (BER) и скорости передачи (бит/символ) при различных отношениях энергии поднесущей ($E_S$) к энергии шума ($E_S/N_0$) в условиях многолучевого распространения, где отношение $E_S/N_0$ вычисляется по следующей формуле:

$$E_S/N_0 \text{ (дБ)} = E_b/N_0 \text{ (дБ)} + 10 \log(k), \qquad (1)$$

где $k$ – количество информационных бит на символ; $E_b$ – энергия, требуемая для передачи одного бита.

Результаты моделирования приведены на рис. 1–3.

В качестве каналов передачи были выбраны три модели многолучевых каналов с частотно-селективными замираниями. Это модели Pedestrian-A (Ped_A), Vehicular-B, рекомендованные Международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union – ITU) и WIMAX форумом [7], и модель Typical_Urban (Typ_U) консорциума 3GPP [8]. Импульсные характеристики каналов распространения радиоволн приведены в таблице.

Каждая точка на графиках, характеризующих результаты моделирования, получена путем усреднения по ансамблю из тысячи различных реализаций импульсных характеристик. В качестве передаваемого сигнала использовалась последовательность из пяти OFDM символов, 256 поднесущих в каждом, из которых 192 – информационных. Для устранения межсимвольной интерференции циклический префикс составлял 1/2 символа. Полоса частот, занимаемая сигналом, 10 МГц. Доступные модуляции: BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64. Следует заметить, что в условиях моделирования оценка канала производилась не только по восьми пилотам, расположенным в символе, но и по каждой поднесущей. Значение $H$ для каждого блока вычислялось методом усреднения.

Из рисунков 1–3 следует, что система битлоадинга, использующая алгоритм Yu, более эффективна на сложных каналах. Так, при достижении одинаковой скорости передачи и использовании алгоритма Yu, вероятность битовой ошибки уменьшается от 3 дБ (канал Pedestrian-A) до 8 дБ (канал COAST_395 Typical_Urban) по сравнению с использованием постоянной QPSK модуляции. Моделирование также показывает, что уменьшение количества блоков разбиения сильнее сказывается на более сложных каналах. При одинаковом отношении $E_b/N_0$ = 10 дБ и канале Pedestrian-A при разбиении на восемь блоков скорость передачи падает на 25 бит/символ, а вероятность битовой ошибки остается прежней. При моделировании канала Typical_Urban и тех же параметрах скорость падет на 125 бит/символ и вероятность битовой ошибки увеличивается на 4 дБ. Однако даже при разбиении всего на четыре блока происходит увеличение скорости передачи при одинаковой вероятности битовой ошибки по сравнению с QPSK модуляцией при каналах с малой многолучевостью. При сложных каналах, таких, как Typical_Urban, разбиение на малое количество блоков малоэффективно.

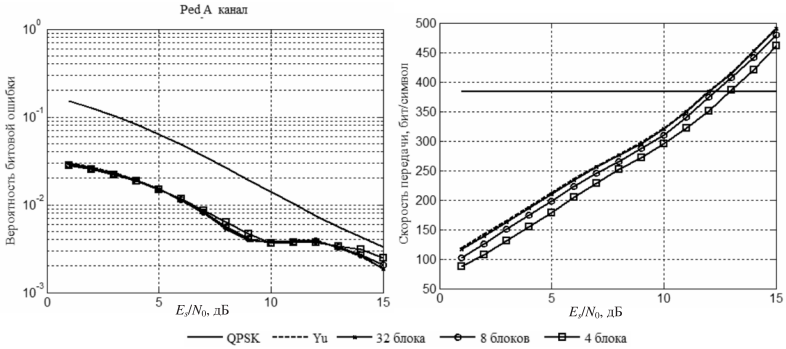



Рис. 1. BER и скорость передачи для канала Pedestrian-A

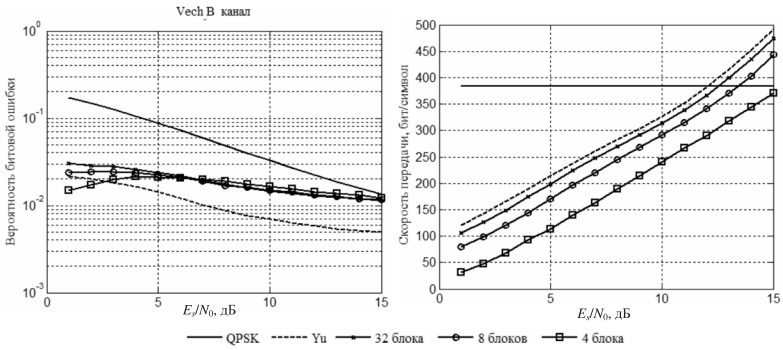



Рис. 2. BER и скорость передачи для канала Vehicular-B

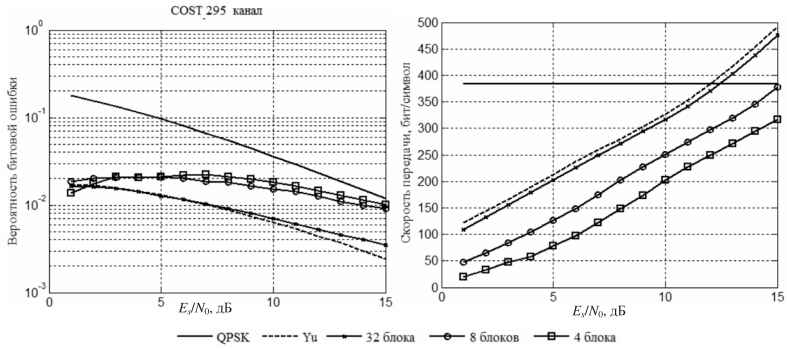



Рис. 3. BER и скорость передачи для канала Typical_Urban

Таким образом, в статье показано, что

• применение адаптивного метода битлоадинга, основанного на алгоритме Yu, позволяет значительно увеличивать скорость передачи с достижением BER, соизмеримым или даже меньшим, чем при использовании одного индекса модуляции;

• предложенный алгоритм с разбиением символа на блоки также имеет выигрыш по сравнению со случаем использования одного индекса модуляции, даже при малом количестве блоков разбиения, однако уступает алгоритму Yu, причем различия существенны на сложных каналах. Однако за счет объединения по блокам требуется меньшее количество информации, передаваемой по служебному каналу связи;

• в условиях многолучевого канала с быстрыми частотно-селективными замираниями для достижения высокой скорости передачи данных при низком значении вероятности битовой ошибки необходимо увеличивать количество разбиваемых блоков;

• предложенный алгоритм битлоадинга может быть использован для увеличения скорости передачи данных в системах связи на базе стандарта IEEE 802.16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Li, Y.** Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications [Text] / Y. Li, G. Stuber. –NY: Springer, 2006. –308 p.

2. IEEE Std. 802.16. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html (Дата обращения 10.08.2012)

3. **Проакис, Д.** Цифровая связь [Текст] / Д. Проакис; Пер. с англ.; Под ред. Д.Д. Кловского. –М.: Радио и связь, 2000. –800 с.

4. **Hughes-Hartogs, D.** Ensemble modem structure for imperfect transmission media: Патент 4679227 US, МПК H04M 11/00. [Text] / D. Hughes-Hartogs, M. Hill // № 736200; заявл. 20.05.1985; опубл. 7.06.1987. –19 p.

5. **Yu, W.** On constant power water-filling [Text] / W. Yu, J. Cioffi // IEEE International Conf. on Communications. –2001. –Vol. 6. –P. 1665–1669.

6. **Aceña, M.** Power and Bit Allocation for Multicarrier Modulation in Multi-User Environments [Электронный ресурс] / M. Aceña. –Режим доступа: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.62.6164&rep=rep1&type=pdf (Дата обращения 18.01.2013)

7. ITU-R Recommendation M.1225. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!!PDF-E.pdf (Дата обращения 07.08.2012)

8. 3GPP TR 25.943. Universal Mobile Telecommunications System (Release 6) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125943/06.00.00_60/tr_125943v060000p.pdf (Дата обращения 07.08.2012)

УДК 621.37

*В.А. Сороцкий (Санкт-Петербург, Россия),*
*В.М. Царев (Москва, Россия)*

# МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*V.A. Sorotsky (St.-Petersburg, Russia),*
*V.M. Tsarev (Moscow, Russia)*

# METHODS OF GENERATION SIGNALS IN TRANSMITTERS OF PERSPECTIVE NAVIGATION SYSTEMS

Рассмотрены перспективы дальнейшего развития наземных навигационных систем. С учетом требований, предъявляемых к системам нового поколения «eLORAN» и «eЧАЙКА», предложен новый подход к построению усилителей мощности радиопередающих устройств. Приведены результаты расчетов некоторых технических характеристик усилителей мощности.

НАЗЕМНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЙ СИГНАЛ. РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ.

The paper covers the perspectives of further development of land-based navigation systems. Considering the requirements for the next generation «eLORAN» and «eChAYKA» systems a new approach to development of transmitters' power amplifiers has been proposed. Results of modelling some technical characteristics of power amplifiers are included.

LAND-BASED NAVIGATION SYSTEM. RADIONAVIGATION SIGNAL. TRANSMITTER. POWER AMPLIFIER.

После развертывания систем GPS и ГЛОНАСС ряд заинтересованных стран, и в первую очередь США, Россия, Великобритания, Франция, Норвегия, Южная Корея, довольно быстро осознали, что недооценка рисков, связанных с преднамеренным или непреднамеренным нарушением их работоспособности может сопровождаться серьезными негативными последствиями как в сфере национальной безопасности, так и в экономике [1, 3]. В этой связи принято решение о независимом резервировании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2, 3] и на эту роль лучше всего подходят наземные радионавигационные системы.

Помимо отмеченной выше возможности нарушения работоспособности ГНСС, существуют и чисто технические проблемы. Как показал опыт практического применения систем GPS и ГЛОНАСС, последние не всегда обеспечивают требуемые характеристики координатно-временного обеспечения (КВО) потребителей по таким основным показателям, как целостность и доступность навигационной информации, точность и непрерывность определения координат подвижных объектов [4, 5]. Указанная проблема может быть преодолена на основе интегрированного использования ГНСС и наземных импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС) [1, 4, 5].

Отмеченные выше факторы стимулировали начало работ по существенной модернизации ИФРНС. Этот процесс ставит своей целью плавный переход к системам нового поколения – типа «eLoran» (США) и «eЧайка» (Россия), которые должны заметно расширить свои функ-

циональные возможности и улучшить характеристики КВО потребителей [1, 6]. В частности, погрешность местоопределения объекта должна уменьшиться с типичного для систем «Loran-C» и «Чайка», значений 250…500 м до значений порядка 8…10 м, соизмеримых с аналогичными характеристиками ГНСС [1, 3, 6]. Таким образом, реализация указанного плана позволит наземным ИФРНС стать независимым дополнением ГНСС, а в случае необходимости – их резервом.

Необходимость модернизации ИФРНС выдвигает в число первоочередных проблем и задачу повышения энергетических и качественных характеристик входящих в их состав радиопередающих устройств (РПдУ). Именно они по многим важным показателям определяют облик радионавигационных систем нового поколения. Решение данной задачи должно осуществляться на основе последних достижений в технике и технологии разработки мощных РПдУ.

Для того чтобы подчеркнуть принципиальные отличия рассматриваемых в настоящей статье перспективных методов генерирования и стабилизации параметров излучаемых радионавигационных сигналов, вначале целесообразно рассмотреть наиболее характерные особенности существующих методов их генерирования.

### Основные ограничения метода ударного возбуждения колебаний в антенне РПдУ

Применяемым до последнего времени в наземных ИФРНС радиопередающим устройствам, которые разрабатывались на основе полученных во второй половине XX века теоретических решений и ориентировались на использование электронно-вакуумных и газоразрядных приборов (единственно возможной в тот период времени элементной базе, позволявшей получить на частоте в 100 кГц мощность в антенне порядка сотен киловатт – единиц мегаватт), присущ ряд серьезных недостатков. Они связаны как с обеспечением сравнительно жестких требований, предъявляемых к форме генерируемых радиоимпульсов, так и с необходимостью поддержания стабильности их параметров в условиях воздействия различного рода дестабилизирующих факторов.

В получившем широкое распространение методе ударного возбуждения формирование колебаний в антенной системе осуществляется при воздействии на выходную колебательную систему РПдУ с помощью одного импульса.

Подбором параметров колебательной системы и импульса возбуждения в данной схеме можно обеспечить формирование заданной огибающей радиоимпульса с требуемой точностью при условии, что параметры нагрузки остаются неизменными. Однако при изменении параметров нагрузки или воздействии иных дестабилизирующих факторов никаких механизмов, позволяющих обеспечить стабилизацию характеристик огибающей и фазы высокочастотного заполнения радионавигационного сигнала [7, 8], в данном методе практически не существует.

Следует отметить, что энергия, которая подводится к антенне РПдУ в течение интервала времени формирования выходного сигнала, передается от источника питания в колебательную систему в течение сравнительно короткого импульса возбуждения. Как следствие этого, пиковая мощность импульса возбуждения должна превышать среднюю мощность выходного радионавигационного импульса в десятки раз. Это условие даже при сравнительно небольшом значении пиковой мощности $P_{пик} \approx 100$ кВт приводит к необходимости генерирования входного импульса тока с амплитудой в тысячи ампер, что существенно усложняет реализацию данного метода по сравнению с другими рассматриваемыми ниже методами формирования радионавигационных сигналов.

### Методы, основанные на формировании на входе антенны напряжений (токов) ступенчатой формы

Альтернативой способу ударного возбуждения колебаний могут служить методы, основанные на генерировании напряжений (токов) ступенчатой формы с изменяемыми по определенному правилу амплитудами ступеней. При этом в случае, когда эквивалентная схема замещения антенны и согласующего устройства может быть представлена в виде последовательного колебательного контура, получение ступенчатого сигнала на ее входе должно обеспечиваться путем последовательного соединения необходимого числа импульсных источников напряжения. В варианте, когда указанная эквивалентная цепь представляется в виде параллельного контура, ее возбуждение должно осуществляться путем параллельного соединения варьируемого по

определенному закону количества импульсных источников тока. Высокая энергетическая эффективность и в том, и в другом случае обеспечивается за счет ключевого режима работы импульсных источников, а повышение стабильности излучаемых импульсов при изменении параметров антенной системы может быть реализовано за счет адаптивной подстройки параметров ступенчатых сигналов. Следует отметить, что с теоретической точки зрения обе эти задачи являются дуальными и решение одной из них может распространяться при соответствующей замене обозначений (тока на напряжение или наоборот) и на другую. С практической точки зрения генерирование импульсов тока прямоугольной формы обычно представляет собой значительно более сложную задачу, чем генерирование импульсов напряжения. В этом случае может оказаться более предпочтительным перейти от сложения в нагрузке РПдУ импульсов тока прямоугольной формы к сложению полуволн тока гармонической формы. Примером такого решения, в частности, может служить генератор Accufix 7500, разработанный компанией «Megapuls» [9]. Однако даже с учетом такой модификации данного метода его применение не позволит реализовать массогабаритные показатели РПдУ, которые могут быть достигнуты при использовании метода возбуждения колебаний в антенной системе с помощью последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Возможные варианты практической реализации последнего метода и их характеристики рассмотрены ниже.

### Методы формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных сигналов на основе сложения выходных напряжений ключевых генераторных ячеек

Основная идея данного подхода состоит в структурировании усилителя мощности РПдУ на большое количество однотипных по своим характеристикам элементарных секций – генераторных ячеек (ГЯ), работающих в ключевом режиме. Такое структурирование обеспечивает возможность:

формировать напряжение ступенчатой формы с заданными параметрами на основе динамически изменяемого количества ГЯ, участвующих в работе на отдельных временных интервалах;

сохранять работоспособность РПдУ при выходе из строя отдельных ГЯ, если количество продолжающих функционировать ГЯ превышает минимально допустимый предел.

Следует особо отметить, что последнее свойство позволяет получить требуемый уровень надежности РПдУ при относительно небольшой избыточности резервирования ГЯ и, тем самым, избавиться от недостатков методов резервирования с целой кратностью. Применительно к рассматриваемой в настоящей публикации теме разработки РПдУ для наземных ИФРНС недостаток метода резервирования с целой кратностью проявляется в том, что для обеспечения требуемой надежности приходится использовать еще один радиопередатчик, находящийся в «горячем» резерве.

Структурирование усилителя мощности РПдУ на сравнительно большое количество однотипных ГЯ может использоваться не только для повышения его надежности, но также и для решения задачи стабилизации параметров излучаемых навигационных импульсов на основе компьютерного управления.

Исходя из отмеченных выше преимуществ обсуждаемого в данном разделе подхода, представляется целесообразным рассмотреть несколько методов формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных импульсов, классификация которых приведена на рис. 1.

В первом методе формировании импульса тока заданной формы [7] осуществляется путем сложения выходных напряжений варьируемого по определенному правилу количества ГЯ. При этом каждая из ГЯ, работающих в ключевом режиме, формирует отрезок колебаний прямоугольной знакопеременной формы типа «меандр». Данный метод может быть реализован двумя способами: когда все ГЯ имеют одинаковое выходное напряжение, а также когда определенная часть ГЯ имеет уменьшенное значение выходного напряжения для более точной подстройки формы огибающей импульса тока. И в том, и в другом случае регулирование (стабилизация) параметров радионавигационного сигнала может осуществляться изменением количества ГЯ: включением в работу дополнительных ГЯ или, наоборот, исключением из процесса формирования выходного напряжения использовавшихся до этого ГЯ. Использование ГЯ с уменьшенным значением выходного напряжения, или т. н. «подстроечных» ГЯ позволяет уменьшить их общее количество при обеспечении тех же требований к точности формирования импульса тока [7, 8].

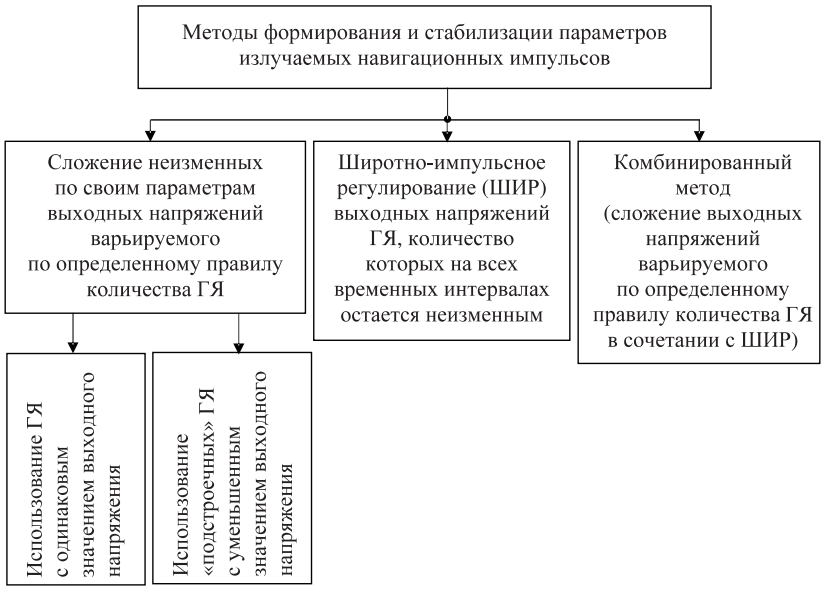



Рис. 1. Методы формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных сигналов

Второй метод предполагает использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходных напряжений ГЯ по закону, обеспечивающему получение в антенне импульса тока заданной формы [7, 8]. Для получения требуемой мощности в антенне может использоваться не одна, а несколько ГЯ, но при этом следует обратить внимание на то, что количество ГЯ, участвующих в формировании импульса тока, на всех временных интервалах остается неизменным, а стабилизация параметров радионавигационного сигнала может быть осуществлена на основе широтно-импульсного регулирования (ШИР).

Третий метод может рассматриваться как комбинация первых двух методов: формирование импульса тока заданной формы [7, 8] осуществляется путем сложения выходных напряжений варьируемого по определенному правилу количества ГЯ, а стабилизация параметров импульса тока осуществляется на основе ШИР. Применение такого подхода может оказаться перспективным с точки зрения уменьшения углов регулирования выходных напряжений ГЯ, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению коммутационных потерь в транзисторах ГЯ.

## Формирование радионавигационного сигнала на основе динамического сложения напряжений транзисторных генераторных ячеек

Напряжение гармонической формы, которое необходимо приложить ко входу антенны с добротностью $Q$ для получения импульса тока $i(t) = A\left(\frac{t}{65}\right)^2 e^{2-2t/65}\sin(2\pi t/10 + PC)$, соответствующего требованиям ИФРНС «Loran-C» [7], описывается выражением:

$$E_0(t) = \frac{E(t)}{AR} = Bt^2 e^{-at}\sin\omega t + \frac{Q}{\omega}Bte^{-at}(2-at)\sin\omega t + QBt^2 e^{-at}\cos\omega t + \frac{Q\omega B}{2j}\left\{e^{z_1 t}\left[\frac{t^2}{z_1} - \frac{2t}{z_1^2} + \frac{2}{z_1^3}\right] - e^{z_2 t}\left[\frac{t^2}{z_2} - \frac{2t}{z_2^2} + \frac{2}{z_2^3}\right]\right\} + \frac{Q\omega B}{2j}\left(\frac{2}{z_2^3} - \frac{2}{z_1^3}\right), \quad (1)$$

где $A$ – масштабный множитель, $z_{1,2} = -a \pm j\omega$, $B = (e/65)^2$, $a = 2/65$, $\omega = 2\pi/10$.

При использовании в качестве ГЯ ключевых генераторов (КГ), выполненных по мостовой схеме, значение напряжения прямоугольной формы $e_i$, которое необходимо приложить ко входу антенны на полупериоде с номером $i$ ($i$ = 1, 2, 3, …), связано с амплитудой первой гармоники напряжения $[(E_0)_{\max}]_i$, действующей на входе антенны в течение этого же полупериода, соотношением:

$$e_i \approx \pi[(E_0)_{\max}]_i / 4. \quad (2)$$

Таким образом, с помощью (1) и (2) можно рассчитать последовательность напряжений прямоугольной формы $e_i$ ($i$ = 1, 2, 3, …), которые

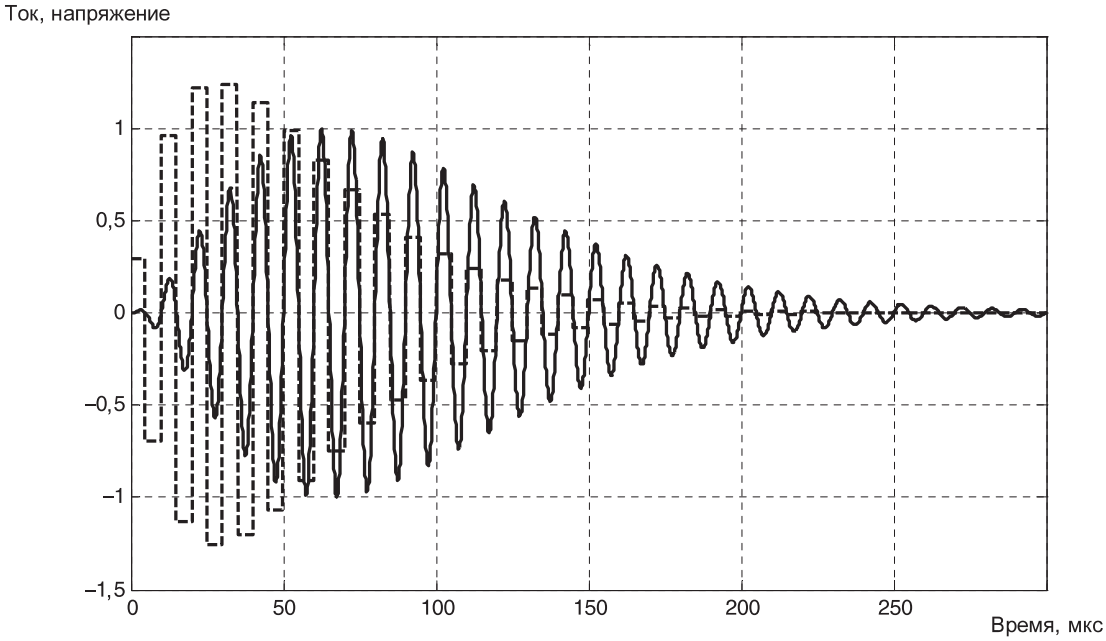



Рис. 2. Временные диаграммы прямоугольного знакопеременного напряжения на входе антенны и тока, протекающего через антенну, при $Q = 16$
(———) ток; (- - -•- - -) напряжение

необходимо приложить ко входу антенны с добротностью $Q$ для получения импульса тока, используемого в ИФРНС «Loran-C» (рис. 2).

Строго говоря, использованный в (2) известный коэффициент, связывающий между собой амплитуду первой гармоники напряжения и значение прямоугольного знакопеременного напряжения типа «меандр», применим только в установившемся режиме. Характерной особенностью данного случая является как раз то, что свободные колебания, обусловленные переходными процессами, не успевают закончиться и наряду с вынужденной составляющей колебаний также участвуют в формировании выходного импульса тока. Чтобы подчеркнуть эту особенность рассматриваемой задачи, которая может привести к погрешности в (2), в этом соотношении использован знак приближенного равенства.

Принимая во внимание, что переход от напряжения гармонической формы (1) к напряжению прямоугольной формы (2) будет сопровождаться погрешностью формирования огибающей импульса тока, представляется целесообразным определить такие значения $e_i$ ($i$ = 1, 2, 3, …), при которых указанная погрешность будет не только отвечать требованиям стандарта [7], но и будет принимать минимальные значения.

Для реализации поставленной цели решена оптимизационная задача:

$$F(\vec{e}) \to \min, \tag{3}$$

где

$$F = \sqrt{\left\{\sum_{n=1}^{8}[I_n(\vec{e}) - S_n]^2\right\}\Big/8} \text{ – целевая функция [7, 8];} \tag{4}$$

$I_n(\vec{e})$ – нормированное значение амплитуды тока в антенне на полупериоде с номером $n$, зависящее от вектора варьируемых параметров $\vec{e} = \{e_i\}$, $i = 1, 2, ..., 13$; $S_n$ – эталонное нормированное значение амплитуды тока на полупериоде с номером $n$.

Решение задачи (3) осуществлялось с учетом следующих ограничений, накладываемых на $I_n(\vec{e})$ [7, 8]:

$$\left|I_n(\vec{e}) - S_n\right| \le 0{,}03; \quad n = 1, 2, ..., 8; \tag{5}$$

$$\left|I_n(\vec{e}) - S_n\right| \le 0{,}1; \quad n = 9, 10, ..., 13. \tag{6}$$

Отличительной особенностью рассматриваемой оптимизационной задачи (3) с учетом ограничений (5), (6), приводящей к существенному ее усложнению, является то, что для нахождения нормированных амплитуд токов $I_n(\vec{e})$ при каждом наборе значений вектора варьируемых параметров $\vec{e} = \{e_i\}$, $i = 1, 2, ..., 13$ необходимо решить

**Оптимальные значения вектора $\vec{e} = \{e_i\}$, $i = 1, 2, ..., 13$**

| Эквивалентная добротность антенны | $n$ ($i$) | $\vec{e}_{\text{opt}} = \{e_{i\,\text{opt}}\}$, $i = 1, 2, ..., 13$ | $I_n(\vec{e})$ ($n$ = 1, 2, 3, …, 13) | $F$ | $\lvert I_n(\vec{e}) - S_n \rvert$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $Q$ = 13,5 | 1 | 0,2235 | 0,0156 | $4{,}5\cdot10^{-8}$ | $3{,}2\cdot10^{-8}$ |
| | 2 | 0,7669 | 0,0832 | | $5{,}2\cdot10^{-9}$ |
| | 3 | 0,8874 | 0,1898 | | $4{,}9\cdot10^{-8}$ |
| | 4 | 1,2039 | 0,3153 | | $4{,}2\cdot10^{-8}$ |
| | 5 | 1,1406 | 0,4448 | | $1{,}5\cdot10^{-8}$ |
| | 6 | 1,3297 | 0,5687 | | $3{,}2\cdot10^{-8}$ |
| | 7 | 1,1575 | 0,6803 | | $5{,}5\cdot10^{-8}$ |
| | 8 | 1,2775 | 0,7760 | | $8{,}2\cdot10^{-8}$ |
| | 9 | 1,1406 | 0,8599 | | 0,0056 |
| | 10 | 1,0683 | 0,9200 | | 0,0050 |
| | 11 | 0,9892 | 0,9628 | | 0,0045 |
| | 12 | 0,9071 | 0,9897 | | 0,0041 |
| | 13 | 0,8251 | 1,0022 | | 0,0037 |
| $Q$ = 16,0 | 1 | 0,2665 | 0,0159 | $5{,}6\cdot10^{-4}$ | 0,0002 |
| | 2 | 0,8831 | 0,0828 | | 0,0004 |
| | 3 | 1,0536 | 0,1904 | | 0,0005 |
| | 4 | 1,3343 | 0,3147 | | 0,0006 |
| | 5 | 1,3566 | 0,4454 | | 0,0007 |
| | 6 | 1,4022 | 0,5680 | | 0,0007 |
| | 7 | 1,3867 | 0,6809 | | 0,0005 |
| | 8 | 1,2715 | 0,7754 | | 0,0006 |
| | 9 | 1,2092 | 0,8505 | | 0,0038 |
| | 10 | 1,1894 | 0,9137 | | 0,0013 |
| | 11 | 1,0523 | 0,9616 | | 0,0032 |
| | 12 | 0,9150 | 0,9887 | | 0,0030 |
| | 13 | 0,8099 | 0,9988 | | 0,0004 |

систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в антенной системе РПдУ. Результаты решения оптимизационной задачи для представляющего практический интерес набора значений $Q$ представлены в таблице.

Значения вектора $\vec{e}_{\text{opt}}$ охватывают 1…13 полупериоды генерируемого импульса тока, поскольку жесткие ограничения, накладываемые спецификацией ИФРНС «Loran-C», распространяются именно на эти временные интервалы. Что же касается последующих временных интервалов ($i$ > 13), то в [7] требования к ним не оговариваются, поэтому в качестве амплитуды напряжения прямоугольной формы, прикладываемого к антенне на соответствующем временном интервале ($i$ = 13, 14, 15, ...), можно использовать значения, рассчитанные с помощью (2), (3).

Полученные в результате решения оптимизационной задачи (3) напряжения ступеней соответствуют идеализированному случаю, когда количество ГЯ $N_{\text{ГЯ}} \to \infty$. Использование конечного количества ГЯ в РПдУ неизбежно приведет к отклонению напряжений ступеней от их оптимальных значений и, как следствие этого, увеличению среднеквадратического отклонения $F$. Зависимости $F$ от $N_{\text{ГЯ}}$ для двух значений эквивалентной добротности антенны $Q$ приведены на рис. 3.

При сравнительно малом количестве ГЯ ($5 \le N_{\text{ГЯ}} \le 10$) поведение функции $F$ имеет явно

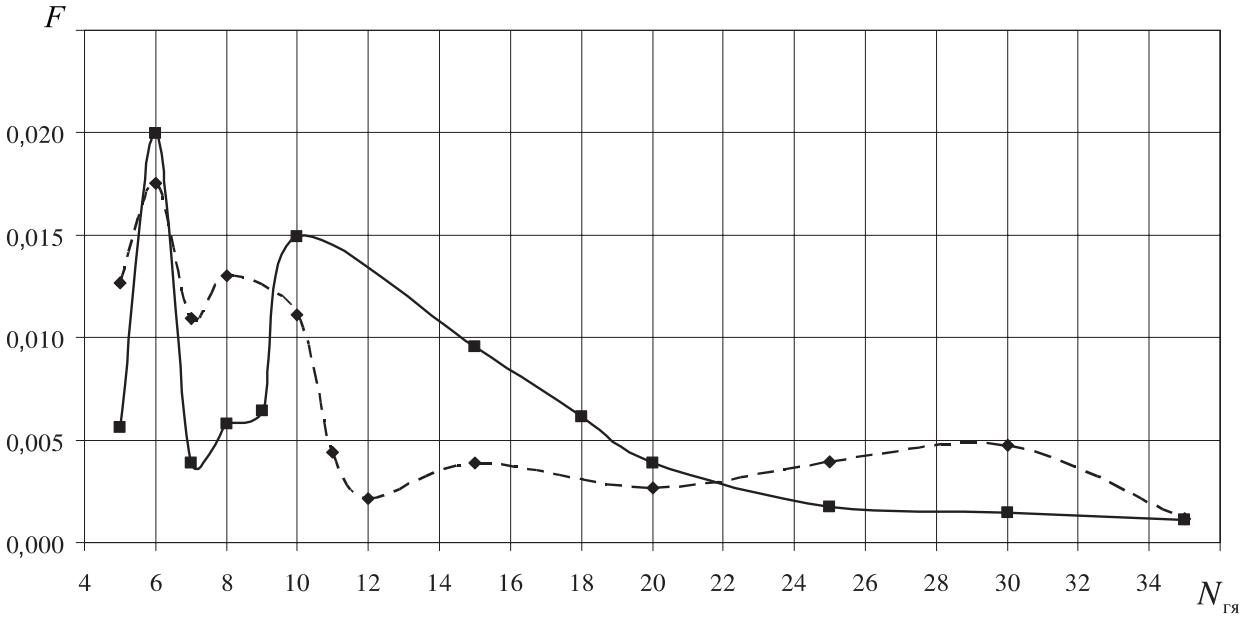



Рис. 3. Зависимости среднеквадратического отклонения $F$ от $N_{ГЯ}$
(- - -◆- - -) $Q$ = 16; (—■—) $Q$ = 13,5

выраженный пульсирующий характер. Это объясняется тем, что при $N_{ГЯ} < 10$ эффект от добавления каждой дополнительной ГЯ может оказаться как положительным, когда расхождение основных компонент вектора аппроксимирующих напряжений ступеней $\vec{e}_{\text{approx}} = \{e^{(i)}_{\text{approx}}\}$, $i = 1, 2, ..., 13$, оказывающих наиболее заметное влияние на функцию $F$, и аналогичных компонент вектора $\vec{e}_{\text{opt}} = \{e_{i\,\text{opt}}\}$, $i = 1, 2, ..., 13$, уменьшится, так и, наоборот, привести к увеличению этого расхождения.

При $N_{ГЯ} \geq 10$ поведение представленных на рис. 3 зависимостей становится существенно более монотонным. Полученные результаты свидетельствуют, что при $Q$ = 13,5 сформулированное в [7] условие $F \leq 0{,}01$ выполняется при $N_{ГЯ} \geq 15$, а при $Q$ = 16 – соответственно при $N_{ГЯ} \geq 11$. При этом окончательное решение о необходимом количестве ГЯ следует принимать с учетом обеспечения как требуемой выходной мощности в пиковой точке, так и необходимого резервирования.

Реализация усилителей мощности радиопередающих устройств перспективных наземных ИФРНС на основе предложенных принципов позволит обеспечить их преимущество по сравнению с существующими прототипами по целому ряду важнейших показателей, в том числе:

значительное снижение погрешности формирования огибающей и фазы высокочастотного заполнения радионавигационного сигнала как при работе на антенну с номинальными параметрами, так и при изменении последних;

компьютерное управление работой РПдУ и мониторинг параметров излучаемых сигналов, создающие предпосылки для перехода к развертыванию необслуживаемых радиопередатчиков с уменьшенными эксплуатационными расходами, контроль за основными рабочими характеристиками которых может осуществляться в дистанционном режиме;

повышение надежности РПдУ за счет реализации усилителя мощности в виде структурированного набора генераторных ячеек, количество которых должно выбираться не только исходя из условия получения требуемой выходной мощности, но и введения избыточности, достаточной для того, чтобы радиопередатчик продолжал функционировать при выходе из строя отдельных ячеек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радионавигационный план Российской Федерации (ред. 2011 г.) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.internavigation.ru

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2008 г. № 323.

3. **Narins, M.J.** The eLoran Evaluation and

Modernization Program: Federal Aviation Administration Navigation Services Overview [Электронный ресурс] / M.J. Narins // International CGSIC Meeting. –Geneva, Switzerland, 28 May 2007.

4. **Царев, В.М.** Пути повышения эффективности радионавигационных систем дальней навигации наземного и космического базирования при их комплексном применении: Дис. … канд. техн. наук [Текст] / В.М. Царев. –М.: Моск. академия рынка труда и информационных технологий, 2005.

5. **Кульнев, В.** Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам [Текст] / В. Кульнев, С. Михайлов // Беспроводные технологии. –2006. –№ 3. –С. 61–69.

6. Final Programmatic Environmental Impact Statement on the Future of the United States Coast Guard Long Range Aids to Navigation (Loran–C) Program [Электронный ресурс] / US Coast Guard, Docket Number: USCG-2007-28460, May, 2009.

7. Specification of the Transmitted Loran–C Signal: Commandant Instruction M 16562.4A [Электронный ресурс] / United States Department of Transportation, United States Coast Guard. –1994.

8. ГОСТ Р 53168-2008. Система радионавигации «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. –М.: Стандартинформ, 2009. –21 с.

9. **Johannessen, E.** Accufix System Enhancements for eLoran [Электронный ресурс] / E. Johannessen. –Megapulse Inc., 2008.

УДК 004.93'1

*М.Д. Поляк*
*Санкт-Петербург, Россия*

# МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

*M.D. Polyak*
*St.-Petersburg, Russia*

# A STOCHASTIC ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL FOR PATTERN RECOGNITION

Рассмотрена стохастическая искусственная нейронная сеть на основе машины Больцмана и особенности ее применения к задачам обработки данных, в частности, к задаче распознавания рукописных чисел. Предложен алгоритм оценки внутреннего состояния такой сети с помощью карт признаков.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ. МАШИНА БОЛЬЦМАНА. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ.

A stochastic artificial neural network based on the Boltzmann machine is examined and some aspects of applying stochastic networks to information processing tasks such as handwritten digits recognition are considered. An algorithm is proposed for evaluating internal state of the network with feature maps.

STOCHASTIC ARTIFICIAL NEURAL NETWORK. BOLTZMANN MACHINE. PATTERN RECOGNITION.

Традиционные алгоритмы компьютерного зрения и машинного обучения не могут сравниться с производительностью человеческого мозга при решении таких задач, как распознавание рукописного текста, выделение объектов на изображении, распознавание лиц и т. п. Искусственные нейронные сети позволяют алгоритмам распознавания образов приблизиться к производительности человеческого мозга. С помощью нейросетевого подхода становится возможным автоматизировать процесс выделения информативных признаков из изображения или сложного по своей структуре сигнала.

Искусственную нейронную сеть принято называть *стохастической*, если ее весовые коэффициенты, характеризующие связи между нейронами, принимают случайные значения, либо если передаточная функция нейрона является случайной функцией. В последнем случае нейронную сеть также называют *машиной Больцмана* [1, 2].

Стохастические нейронные сети позволяют строить вероятностные модели сложных процессов. В ходе обучения на основе имеющихся экспериментальных данных (обучающей выборки) такая сеть формирует статистическую модель, способную самостоятельно воспроизводить данные в соответствии с их эмпирическим законом распределения [3]. Подобная модель может использоваться для генерации достоверных данных в случае, если экспериментальных данных недостаточно. Детальный анализ нейросетевой модели может помочь пролить свет на структуру исходных процессов, оказавших влияние на формирование экспериментальных данных. Такой подход может применяться в интеллектуальном анализе данных (data mining), при решении задач

классификации, моделирования, прогнозирования и др.

Несомненное достоинство рассматриваемого класса нейросетевых алгоритмов – возможность визуального представления результатов анализа данных, визуализация модели.

В настоящей статье рассматривается стохастическая искусственная нейронная сеть на основе машины Больцмана и возможности ее применения к задачам обработки данных, в частности, для выделения признаков, классификации, распознавания. Приводится анализ нейросетевого подхода к задаче распознавания рукописных чисел. При обработке изображений нейронная сеть может быть представлена как адаптивная система с множеством входов, а при анализе временных рядов нейронная сеть представляется системой с одним входом [4], что позволяет использовать одни и те же нейросетевые алгоритмы для решения задач разного типа.

При решении задачи распознавания образов можно выделить следующие два характерных этапа: выделение информативных признаков из исходного изображения или сигнала и классификация объекта по набору описывающих его признаков. Стохастическая нейронная сеть может использоваться на каждом из этапов по отдельности или задача распознавания образов может целиком решаться с помощью одной многослойной сети. Цель данной статьи – рассмотрение особенностей использования многослойной стохастической нейронной сети для решения задачи распознавания образов.

**Стохастическая нейронная сеть.** Классическая машина Больцмана является обобщением нейросетевой модели Хопфилда [2, 5]. Сеть Хопфилда представляет собой рекуррентную нейронную сеть, состоящую из единственного слоя двоичных нейронов, функционирующих в соответствии с моделью искусственного нейрона МакКаллока–Питтса и имеющих пороговую функцию активации [6]. Модель Хопфилда представляет собой ассоциативную память, она позволяет восстанавливать зашумленные и неполные образы. Ее основные недостатки – малый объем памяти, избыточное количество нейронов, недостоверность результатов (ложные образы) [2].

Искусственная нейронная сеть на основе машины Больцмана имеет два существенных отличия от сети Хопфилда. Во-первых, в машине Больцмана решение о том, что нейрон должен перейти из состояния –1 в состояние +1 (или обратно) является вероятностным:

$$s_i = \begin{cases} +1, & \text{с вероятностью } p(+1) \\ -1, & \text{с вероятностью } 1 - p(+1) \end{cases}, \qquad (1)$$

где $p(+1)$ – вероятность того, что нейрон $s_i$ перейдет из состояния –1 («off») в состояние +1 («on»), а функция, определяющая вероятность активации нейрона, является сигмоидальной. Выбор множества {0;1} возможных состояний двоичного стохастического нейрона вместо принятого в модели Хопфилда множества {–1;+1} не влияет на структуру модели.

Во-вторых, все нейроны в машине Больцмана делятся на два класса: «видимые» и «скрытые». Видимые нейроны в свою очередь могут подразделяться на «входы» и «выходы» сети. Сеть Хопфилда целиком состоит из видимых нейронов и не имеет скрытых. Скрытые нейроны или, как их еще называют, скрытые переменные, позволяют машине Больцмана успешно находить множественные корреляционные связи между признаками, поступающими на вход сети.

Машина Больцмана представляет собой полносвязный граф, представленный на рис. 1 *а*, в котором могут быть выделены два слоя: слой видимых и слой скрытых вершин. Алгоритмы обу-

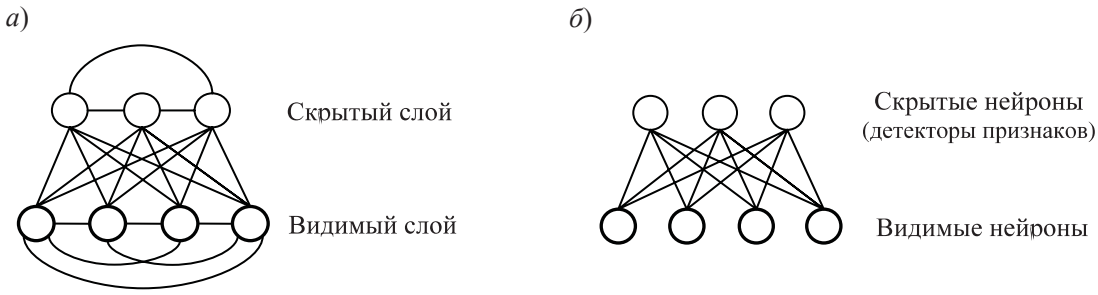



Рис. 1. Графическая модель машины Больцмана с четырьмя видимыми нейронами и тремя скрытыми:
*а* – машина Больцмана; *б* – машина Больцмана с ограничениями

чения и функционирования машины Больцмана подробно рассмотрены в литературе [1, 7, 8]. Из-за большого количества связей в сети алгоритм обучения машины Больцмана труднореализуем, поэтому на практике вводят ряд ограничений.

Машина Больцмана с ограничениями (МБО) – неориентированная графическая модель с двухслойной архитектурой. В отличие от рассмотренной выше общей машины Больцмана, в МБО запрещены все связи видимый-видимый и скрытый-скрытый между нейронами одного слоя. В такой сети присутствуют только связи видимый-скрытый, как показано на рис. 1 *б*. МБО является частным случаем общей машины Больцмана, в которой веса всех связей между нейронами одного слоя равны нулю.

МБО часто рассматривают в качестве мультипликативной экспертной модели [7], поскольку она совмещает в себе множество отдельных составных моделей (экспертов), перемножая их результаты. Такими экспертами являются двоичные скрытые нейроны, которые можно рассматривать как детекторы признаков (рис. 3 *а*). Нейрон-эксперт (детектор признака) выдает единицу на своем выходе с вероятностью

$$P(h_j = 1 \mid \mathbf{v}) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_i w_{ij} v_i - a_j\right)}, \qquad (2)$$

где $h_j = s_j$ – состояние скрытого нейрона $j$, $h_j \in \{0, 1\}$; $\mathbf{v}$ – двоичный вектор, описывающий состояние всех видимых нейронов; $v_i = s_i$ – состояние видимого нейрона $i$, т. е. $i$-я координата вектора $\mathbf{v}$, $v_i \in \{0, 1\}$; $w_{ij} = w_{ji}$ – вес связи между $i$-м видимым и $j$-м скрытым нейронами; $a_j$ – смещение скрытого нейрона $j$.

Таким образом, вероятность $P(h_j = 1 \mid \mathbf{v})$ в выражении (2) характеризует вероятность того, что образ $\mathbf{v}$, поданный на вход сети, содержит признак $j$. Из (2) также следует, что условное распределение для вектора состояния скрытых нейронов может быть задано следующим образом:

$$p(\mathbf{h} \mid \mathbf{v}; W) = \prod_j P(h_j \mid \mathbf{v}), \qquad (3)$$

где $\mathbf{h}$ – двоичный вектор, описывающий состояние всех скрытых нейронов, т. е. вектор признаков; $W$ – симметричная матрица весов связей $w_{ij}$ между всеми нейронами сети. Выражение (3) описывает мультипликативную экспертную модель.

Существенное ограничение МБО – использование двоичных нейронов, поскольку многие реальные данные являются вещественными. Эта проблема решается введением модели стохастического нейрона с вещественным выходом [9]. Функция активации такого нейрона имеет следующий вид:

$$s_i = \frac{\theta_L + (\theta_H - \theta_L)}{1 + \exp\left(-a_i\left(\sum_j w_{ij} s_j + N_i(0, \sigma^2)\right)\right)}, \qquad (4)$$

где $\theta_L$ и $\theta_H$ – нижняя и верхняя границы принимаемых нейроном вещественных значений; $s_i$, $s_j$ – видимый или скрытый нейрон; $a_i$ – параметр; $N_i(0, \sigma^2)$ – гауссов белый шум с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma$.

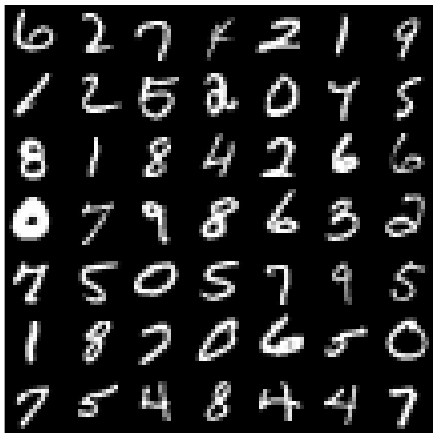


Рис. 2. Примеры изображений рукописных чисел

Нейрон с функцией активации (4) фактически представляет собой модель зашумленного сигнала и в процессе обучения нейронная сеть учится игнорировать шумы (нормальные отклонения) в экспериментальной выборке. Результатом обучения такой сети является робастная нейросетевая модель.

**Распознавание рукописного текста.** Для исследования процесса выбора информативных признаков стохастической нейронной сетью при решении задачи распознавания образов на основе МБО в данной работе построена нейросетевая модель, осуществляющая распознавание изображений рукописных чисел из базы данных MNIST [10]. Пример распознаваемых изображений из этой базы приведен на рис. 2. Числа на изображениях представлены оттенками серого, фон имеет черный цвет. Обучающая выборка содержит 60 000 изображений размерами 28×28 пикселей, разбитых на 10 классов. Тестовая выборка вклю-

чает в себя дополнительные 10 000 изображений.

Исследуемая модель состоит из трех слоев. Первый слой видимых нейронов включает в себя 784 элемента, которые соответствуют изображению с размерами 28×28 = 784 пикселей. Изображение подается на вход сети путем задания в качестве вероятности активации каждого видимого нейрона нормированной от 0 до 1 яркости соответствующего пикселя. Вторым слоем является слой скрытых нейронов, количество которых варьировалось в процессе эксперимента. В третьем слое содержатся метки, соответствующие цифрам от 0 до 9.

В данной модели слой скрытых нейронов осуществляет выделение информативных признаков из изображения, а слой меток выступает в роли классификатора. Качество распознавания можно существенно улучшить, если использовать несколько слоев скрытых нейронов, т. е. выделять информативные признаки из информативных признаков. Такие «признаки признаков» сложно интерпретировать, поэтому в данной работе детально исследовался только первый слой скрытых нейронов. Процесс выделения признаков дополнительными слоями скрытых нейронов в многослойной стохастической нейронной сети полностью аналогичен процессу выделения первичных признаков из исходного изображения.

Исследовалось влияние числа нейронов в скрытом слое на качество распознавания изображений. Наименьшая ошибка классификации, не превышавшая 1,5 %, получена для нейронной сети с 479 нейронами в первом скрытом слое и 300 – во-втором. Помимо этого сеть включала в себя 784 видимых входных нейрона, информация с которых поступала на первый скрытый слой, и 10 видимых нейронов-меток, считывавших информацию со второго скрытого слоя. Выбор числа скрытых нейронов в первом и втором слое осуществлялся с использованием графического представления весов обученной сети.

Для графической интерпретации результата обучения сети построены карты признаков (рис. 3 *в*, *г*). Карта признаков состоит из областей чувствительности всех скрытых нейронов сети. Область чувствительности нейрона-признака может быть представлена графически следующим образом. Веса $w_{ij}$ всех связей данного скрытого нейрона с входными нейронами (рис. 3 *а*) нормируются и интерпретируются как яркость соответствующих пикселей области чувствительности

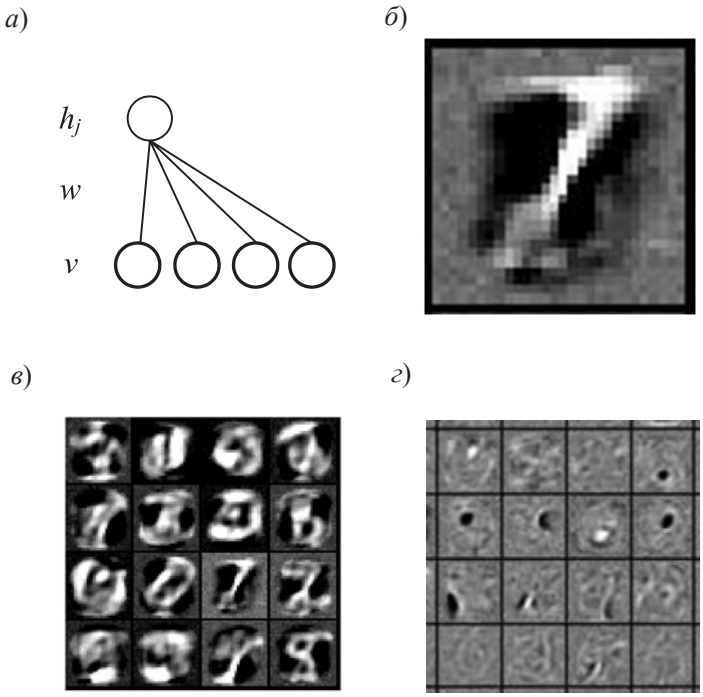



Рис. 3. Графическое представление области чувствительности нейронов:
*а* – скрытый нейрон (эксперт), определяющий наличие во входных данных некоторого признака;
*б* – область чувствительности скрытого нейрона; *в* – карта признаков нейронной сети с 16 скрытыми нейронами; *г* – фрагмент карты признаков нейронной сети с 400 скрытыми нейронами

(рис. 3 *б*). Светлые и темные пиксели на рис. 3 *б* соответствуют областям исходного изображения, которые должны обладать соответственно высокой или низкой интенсивностью для того, чтобы нейрон принял положительное решение о наличии в исходном изображении некоторого признака. Серые пиксели вокруг центральной области на рис. 3 *б* соответствуют области исходного изображения, которая не несет никакой полезной информации для принятия решения о наличии в изображении признака, за который отвечает данный нейрон. Фактически, область чувствительности нейрона представляет собой маску, которая накладывается на изображение. Чем лучше маска подходит к поданному на вход сети изображению, тем выше вероятность активации скрытого нейрона. В соответствии со своей областью чувствительности, нейрон, представленный на рис. 3 *б*, будет иметь самую высокую вероятность активации, когда на вход сети подается изображение чисел 2 и 7 или похожее на них.

Для нейронной сети с 16 скрытыми нейронами карту признаков можно представить в виде матрицы размерностью 4×4, состоящей из изображений областей чувствительности всех скрытых нейронов, как показано на рис. 3 *в*. Каждый элемент матрицы соответствует одному скрытому нейрону-признаку и описывает его область чувствительности, т. е. степень влияния каждого пикселя исходного изображения на принятие решения экспертом о наличии в изображении данного признака.

При увеличении числа скрытых нейронов происходит «размывание» карты признаков. Для сети с 400 скрытыми нейронами область чувствительности любого из них представляет собой серый (нечувствительный) квадрат с небольшим белым или черным пятном (рис. 3 *г*). Такой нейрон будет активен, если соответствующая пятну область на поданном на вход сети изображении будет закрашена (для нейронов с белым пятном на области чувствительности) или будет являться незакрашенным фоном (для нейронов с черным пятном). Остальные пиксели изображения не вносят существенного вклада в процесс принятия решения данным нейроном. Нейроны, область чувствительности которых представляет собой сплошной серый квадрат без белых или черных пятен, являются избыточными, поскольку на их активацию не влияет исходное изображение. После обучения первого слоя скрытых нейронов, но перед началом обучения второго, избыточные нейроны могут быть удалены, т. к. обучение многослойной стохастической нейронной сети осуществляется послойно. Это позволит ускорить процесс дальнейшего обучения, повысить информативность внутреннего представления модели и увеличить точность классификации.

Визуальное представление матрицы весов $W$ в виде карты признаков может использоваться для оценки качества обучения стохастической нейронной сети как после завершения обучения для сравнения между собой нескольких обученных сетей, так и в реальном времени во время обучения. Визуализация области чувствительности скрытых нейронов позволяет лучше понять и интерпретировать признаки изображения, за которые отвечают эти нейроны.

В ходе данного исследования разработан алгоритм визуализации внутреннего состояния стохастической нейронной сети на карте признаков, состоящей из графического представления областей чувствительности нейронов. Данный алгоритм может использоваться для уточнения числа скрытых нейронов в сети, оценки качества ее обучения, что было показано на примере распознавания рукописных чисел.

Использование нескольких скрытых слоев нейронов в машине Больцмана усложняет процесс обучения, но позволяет существенно повысить количество правильно распознанных образов. Обучение многослойной стохастической сети осуществляется послойно, поэтому перед началом обучения нового слоя на основе оценки внутреннего состояния сети целесообразно осуществлять селекцию нейронов-признаков с целью уменьшения их количества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Polyak, M.** Data Processing Using Boltzmann Machines [Text] / M. Polyak // XIII International Forum Modern information society formation – problems, perspectives, innovation approaches: Proc. of the Forum. St. Petersburg, 5-10 Sept.: SUAI. –SPb., 2012. –P. 44–50.

2. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. Хайкин. –М.: ИД «Вильямс», 2006. –1104 с.

3. **Montufar, G.** Refinements of Universal Approximation Results for DBNs and RBMs [Text] / G. Montufar, N. Ay // Neural Computation. –2011. –Vol. 23 (5). –P. 1306–1319

4. **Уидроу, Б.** Адаптивная обработка сигналов

[Текст] / Б. Уидроу, С. Стирнз. –М.: Радио и связь, 1989. –440 с.

5. **Hopfield, J.J.** Neural networks and physical systems with emergent collective computational properties [Text] / J.J. Hopfield // Proc. of the National Academy of Sciences of the USA. –1982. –Vol. 79 (8). –P. 2554–2558.

6. **McCullough, W.S.** A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity [Text] / W.S. McCullough, W.H. Pitts // Bulletin of Mathematical Biophysics. –1943. –Vol. 5. –P. 115–133.

7. **Hinton, G.E.** Training Products of Experts by Minimizing Contrastive Divergence [Text] / G.E. Hinton // Neural Computation. –2002. –Vol. 14 (8). –P. 1771–1800.

8. **Woodford, O.** Notes on Contrastive Divergence [Электронный ресурс] / O. Woodford. –Режим доступа: http://www.robots.ox.ac.uk/~ojw/files/NotesOnCD.pdf (Дата обращения 11.01.2013)

9. **Chen, H.** A Continuous Restricted Boltzmann Machine with an Implementable Training Algorithm [Text] / H. Chen, A.F. Murray // IEE Proc. of Vision, Image and Signal Processing. –2003. –Vol. 150 (3). –P. 153–158.

10. The MNIST Database of handwritten digits by Yann LeCun [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (Дата обращения 11.01.2013)

УДК 621.35

*Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка*
*Тамбов, Россия*

# ПОЛУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ПОВЫШЕННОЙ РАВНОМЕРНОСТЬЮ

*D.S. Solovjev, Yu.V. Litovka*
*Tambov, Russia*

# GENERATING GALVANIC COVERING THICKNESS DISTRIBUTION WITH BETTER UNIFORMITY

Рассмотрено получение более равномерного распределения толщины гальванического покрытия на детали с использованием многоанодной электрохимической ванны. Приведена математическая постановка задачи оптимального управления гальваническим процессом в многоанодной электрохимической ванне. Представлен ряд экспериментов, показывающий возможность использования предложенного способа с целью повышения равномерности распределения толщины гальванического покрытия.

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. МНОГОАНОДНАЯ ВАННА. РАВНОМЕРНОСТЬ ПОКРЫТИЯ. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

The paper deals with obtaining a more uniform distribution of galvanic covering thickness on the detail with use of the multianode electrochemical bath. Mathematical formulation of the optimal control problem in the galvanic process of the multianode electrochemical bath is given in the article. Presented a series of experiments, which shows the possibility of using a new method proposed by the authors to improve the uniformity of the thickness distribution galvanic covering.

GALVANIC PROCESSES. MULTIANODE BATH. UNIFORM OF COVERING. OPTIMAL CONTROL. MATHEMATICAL MODEL.

Гальванические покрытия – один из эффективных методов защиты от коррозии. Они также широко применяются для придания поверхности деталей повышенной твердости и износостойкости, улучшенных антифрикционных свойств, поверхностной электропроводности и для улучшения внешнего вида изделий. На сегодняшний день разработаны и продолжают совершенствоваться различные методы повышения качества наносимого покрытия в соответствии с таким критерием, как равномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода, что наиболее актуально для дорогостоящих электролитов [1]. Дальнейший прогресс в этой области связан с оптимизацией и автоматизацией существующих процессов, модернизацией, совершенствованием технологии, использованием перспективного оборудования, одним из которых являются гальванические ванны со многими анодами [2]. В работе [3] предлагается новый технический подход к использованию ванн со многими анодами, заключающийся в перенесении принципа растровой развертки цифрового изображения из области телевизионного вещания в технологию электрохимической обработки изделий, сущность которого состоит в том, что для управления электрохимическим осаждением металла используется развертка, а градация напряжения на анодных секциях в гальванической ванне осуществляется при движении по строкам в соответствующие промежутки времени.

Цель данной работы – экспериментальное подтверждение возможности получения более равномерного распределения толщины покрытия на поверхности изделия с применением системы независимых анодных секций, функционирующей по принципу растровой развертки, по сравнению с использованием монолитного анода.

### Теоретический анализ

Математическая постановка задачи оптимального управления звучит следующим образом: найти напряжения $U_{m,n}$ на каждой секции анода $S_{m,n}$ для заданной формы детали-катода $S_K$ из поступающей на обработку партии, доставляющие минимум целевого критерия:

$$J = \alpha \cdot R + \beta \cdot T \to \min, \quad (1)$$

где $J$ – целевой критерий; α, β – весовые коэффициенты; $R$ – критерий неравномерности распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода; $T$ – критерий продолжительности гальванического процесса, ч; min – минимальное значение.

Критерий неравномерности распределения толщины покрытия рассчитывается исходя из формулы:

$$R = \frac{1}{\| S_K \|} \int_{S_K} \frac{\delta(x,y,z) - \delta^{\min}}{\delta^{\min}} dS_K + \frac{\delta^{\max} - \delta^{\min}}{\delta^{\min}}, \quad (2)$$

где $x$, $y$, $z$ – пространственные координаты точки, принадлежащей поверхности детали-катода; δ – толщина покрытия в точке ($x$, $y$, $z$), мкм; $S_{m,n}$, $S_K$ – поверхность $m$, $n$-й секции анода и детали-катода; $\| \ \|$ – площадь поверхности, см$^2$.

При этом должно выполняться условие:

$$\delta^{\min} \geq \delta^{\text{zad}}, \quad (3)$$

где zad – заданное значение.

Критерий продолжительности процесса нанесения покрытия:

$$T = \nu \cdot M \cdot N \cdot \Delta\tau / 3600, \quad (4)$$

где ν – число циклов включения анодов, раз; $M$, $N$ – число горизонтальных рядов и количество анодных секций в каждом ряду, шт; Δ – погрешность прибора, мкм; Δτ – время включения анода, с.

Мощность, потребляемая источником питания, рассчитывается как

$$P = \max_{m,n}(U_{m,n} \cdot I_{m,n}), \quad (5)$$

где $P$ – мощность, потребляемая источником питания, Вт; $U_{m,n}$, $I_{m,n}$ – напряжение и сила тока между $m$, $n$-й секцией анода и катодом, В и А соответственно; $m$ – строка, в которой находится анод ($1 \leq m \leq M$); $n$ – столбец в строке, в котором находится анод ($1 \leq n \leq N$).

Электроэнергия, затрачиваемая источником питания на гальванический процесс, определяется следующим образом:

$$Q = P \cdot T, \quad (6)$$

где $Q$ – электроэнергия, затрачиваемая источником питания, Вт·ч.

В систему уравнений математической модели многоанодной ванны, детально описанной в [4] и связывающей варьируемые переменные с целевым критерием, входят закон Фарадея, Ома в дифференциальной форме, уравнение Лапласа с нелинейными граничными условиями третьего рода, которое описывает распределение потенциала в объеме ванны. Проверка адекватности математической модели приводится в работе [5].

Относительные погрешности σ эксперимента и численного расчета для монолитного анода и системы независимых анодных секций рассчитываются из следующей формулы:

$$\sigma = \frac{1}{D} \sum_{(x,y,z) \in S_K} \frac{|\delta^{\text{calc}}(x,y,z) - \delta^{\exp}(x,y,z)|}{\delta^{\exp}(x,y,z)}, \quad (7)$$

где $D$ – количество точек на поверхности детали-катода, шт; exp – экспериментальное значение; calc – расчетное значение; σ – относительная погрешность между расчетом и экспериментом, %.

Поиск решения задачи оптимального управления осуществляется методом «оврагов» с помощью разработанного нами программного средства [6].

*а*) *б*) *в*)

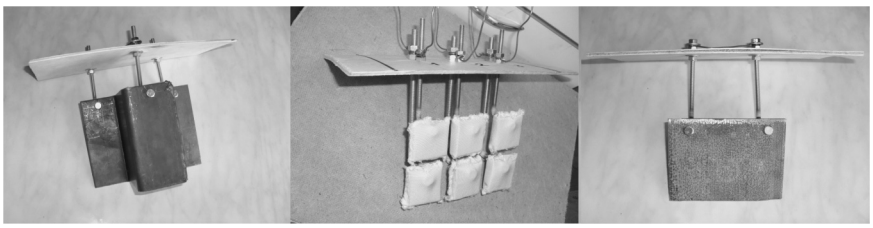


Рис. 1. Конфигурация электродов:
*а* – деталь-катод; *б* – система анодных секций; *в* – монолитный анод

### Экспериментальная часть

С целью получения более равномерного распределения толщины гальванопокрытия на детали, нанесенного с использованием системы из независимых анодных секций, по сравнению гальванопокрытием, полученным стандартным в промышленности способом – с использованием монолитного анода, проведен ряд экспериментов.

Конфигурация детали-катода представлена на рис. 1 *а*, система из 2×3 независимых никелевых анодных секций – на рис. 1 *б*, монолитный никелевый анод – на рис. 1 *в*. Площадь монолитного анода совпадает с суммой площадей системы анодных секций.

Состав электролита Уоттса, г/л: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 260, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 60, $H_3BO_3$ – 45. Локальным контуром стабилизации температуру поддерживали постоянной и равной 55° С.

В работе [7] описан состав и продемонстрирован внешний вид лабораторной установки, реализующий предлагаемый способ нанесения гальванического покрытия в многоанодной электрохимической ванне.

Поскольку из-за влияния случайных факторов толщина покрытия в одной и той же точке катода в разных опытах будет отличаться, каждый эксперимент повторялся не менее трех раз, с последующим усреднением толщины покрытия в геометрически эквивалентных точках. Для измерения толщины покрытия на поверхности катода строилась сетка с шагом 0,5 см по всем координатам. Измерение толщины покрытия осуществляли магнитоиндукционным прибором неразрушающего контроля МИП-10, погрешность которого на диапазоне 1–100 мкм составляет $\Delta = \pm(10\ \%)\ \delta^{exp} \pm 1$ мкм. Полученные экспериментальные данные сглаживались методом скользящего среднего по пяти точкам.

### Результаты и их обсуждение

В результате решения задачи оптимального управления при значениях $\alpha = 1$, $\beta = 5{,}5$ и $\delta^{zad} = 10$ мкм получены следующие значения для системы независимых анодных секций: $U_{1,1} = 9{,}04$ В; $U_{1,2} = 5{,}01$ В; $U_{1,3} = 9{,}11$ В; $U_{2,1} = 8{,}95$ В; $U_{2,2} = 4{,}87$ В; $U_{2,3} = 9{,}07$ В; $I_{1,1} = 6{,}01$ А; $I_{1,2} = 3{,}56$ А; $I_{1,3} = 6{,}55$ А;

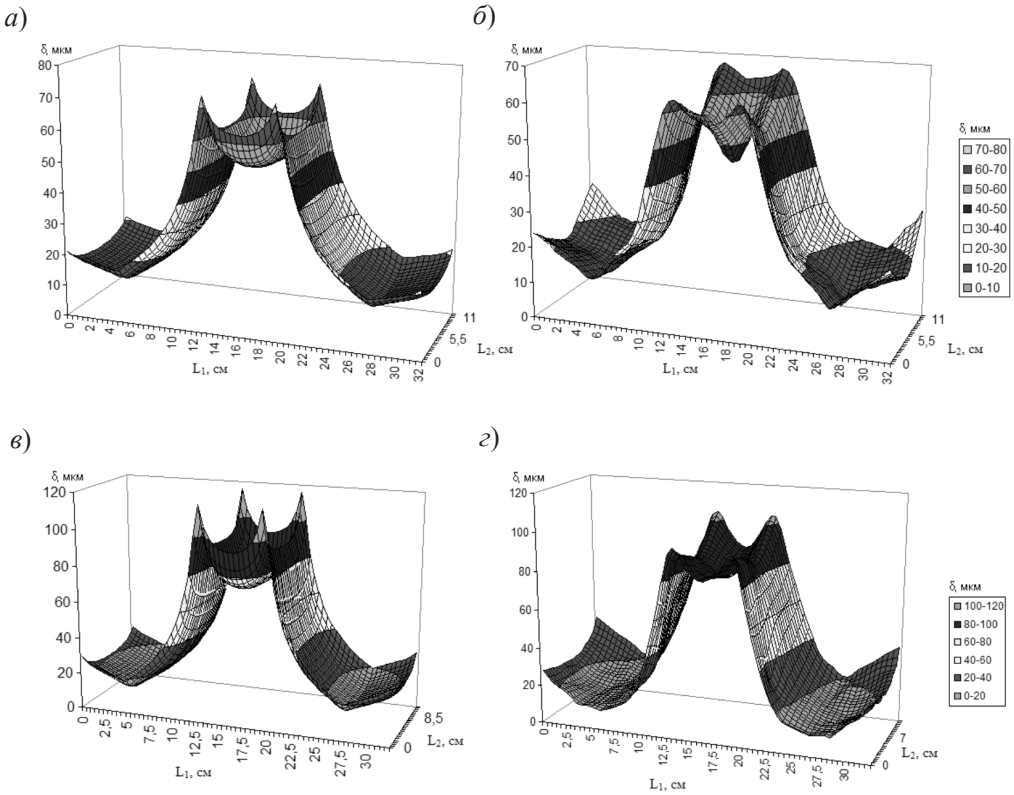



Рис. 2. Распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода:
*а*, *б* – численный расчет и экспериментальное измерение с использованием системы анодов;
*в*, *г* – численный расчет и экспериментальное измерение с использованием монолитного анода

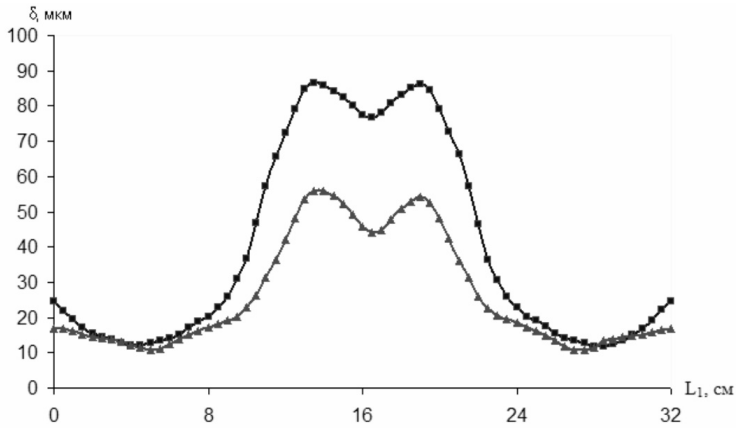



Рис. 3. Экспериментальное распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода для одного из сечений плоскостью, параллельной оси $L_1$
(▲) – использовалась система анодных секций; (■) – использовался монолитный анод

$I_{2,1}$ = 5,93 А; $I_{2,2}$ = 3,39 А; $I_{2,3}$ = 6,42 А. При тех же значениях экспертных коэффициентов и заданной толщины покрытия при использовании монолитного анода получены значения $U$ = 9,9 В и $I$ = 17 А.

На рис. 2 показано распределение толщины покрытия по поверхности детали-катода, рассчитанное по математической модели и экспериментально полученное с использованием системы независимых анодных секций и монолитного анода.

На рис. 3 представлены срезы экспериментального распределения толщины покрытия по поверхности катода для одного из сечений плоскостью, параллельной $L_1 0\delta$, полученные с использованием системы независимых анодных секций и монолитного анода. $L_1$ – длина детали-катода, см; $L_2$ – ширина, см.

В таблице представлены результирующие показатели использования монолитного анода и системы анодных секций.

Проанализировав данные таблицы, можно сделать следующие выводы:

отличие расчетных значений толщины покрытия от экспериментальных соизмеримо с погрешностью измерительного прибора, что позволяет говорить об адекватности математической модели;

неравномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали-катода снизилась на 33,63 %;

потребляемая мощность снизилась в 2,81 раза;

затрачиваемая электроэнергия снизилась в 1,22 раза.

Полученные экспериментальные данные показывают принципиальную возможность использования предложенного способа нанесения гальванического покрытия в многоанодной ванне, функционирующей в режиме циклического переключения независимых анодных секций.

Наибольший экономический эффект достигается в случае использования рассмотренного способа при покрытиях драгоценными металлами, т. к. улучшение равномерности распределения толщины покрытия приводит к уменьшению максимальной локальной толщины и, в конечном сче-

**Сводная таблица результатов**

| Характеристика | Монолитный анод | Система анодных секций |
|---|---|---|
| $J$ | 11,25465 | 19,39721 |
| $R$ | 3,93965 | 2,73221 |
| $T$, ч | 1,33 | 3,03 |
| σ, % | 16,84 | 17,51 |
| $P$, Вт | 168,3 | 59,7 |
| $Q$, Вт·ч | 223,84 | 182,59 |

те, к экономии драгметаллов. Применение такой технологии в промышленном масштабе позволит использовать менее мощные источники питания, что существенно снизит стоимость их приобретения, а также уменьшить электроэнергию, затрачиваемую на гальванический процесс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Литовка, Ю.В.** Моделирование и оптимальное управление технологическими процессами гальванотехники: Дисс. ... д-ра техн. наук [Текст] / Ю.В. Литовка. –Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1999. –305 с.

2. **Дьяков, И.А.** Автоматизация управления технологическими параметрам электрохимических процессов: Дисс. … канд. техн. наук [Текст] / И.А. Дьяков. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1995. –150 с.

3. **Соловьев, Д.С.** Автоматизированная система управления гальваническими процессами в многоанодной электрохимической ванне [Текст] / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Промышленные АСУ и контроллеры. –2012. –№ 7. –С. 15–22.

4. **Соловьев, Д.С.** Математическое моделирование гальванической ванны с циклическим включением анодных секций [Текст] / Д.С. Соловьев // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: сб. трудов Всерос. науч.-технич. конф. –Уфа: Изд-во Уфимского гос. нефт. техн. ун-та, 2010. −С. 142–143.

5. **Соловьев, Д.С.** Проверка адекватности математической модели распределения гальванического покрытия на детали в многоанодной ванне [Текст] / Д.С. Соловьев, Ю.В. Литовка // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. –2012. –Т. 18. –№ 1. –С. 128–135.

6. **Соловьев, Д.С.** Программа оптимизации токовых режимов гальванической ванны с циклическим включением анодных секций [Текст] / Д.С. Соловьев // Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ в ФИПС № 2011617253. Зарег. в реестре программ для ЭВМ 19.09.2011.

7. **Соловьев, Д.С.** Математическое, программное и аппаратное обеспечение системы управления гальваническими процессами в ванне со многими анодами [Текст] / Д.С. Соловьев // Журнал радиоэлектроники. –2012. –№ 4. –Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/apr12/2/text.pdf (Дата обращения 25.05.2012)

УДК 004.056.57

*С.А. Нестеров*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕРВЕРА УПРАВЛЕНИЯ АНТИВИРУСНОЙ ЗАЩИТОЙ

*S.A. Nesterov*
*St.-Petersburg, Russia*

# DATA MINING IN A DATABASE OF THE ANTIVIRUS PROTECTION MANAGEMENT SERVER

Рассмотрено использование методов интеллектуального анализа данных для выявления закономерностей в данных, собираемых сервером управления антивирусной защитой. Результаты подобного анализа могут использоваться для более качественного администрирования системы антивирусной защиты.
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ.

The paper describes some applications of data mining in antivirus protection management systems.
INFORMATION SECURITY. DATA MINING.

Современные корпоративные средства антивирусной защиты, как правило, дополняются средствами централизованного администрирования, которые собирают с клиентских компьютеров большой объем данных. Исследование этих данных методами интеллектуального анализа (data mining) позволяет в ряде случаев выявить в них неявные закономерности, представляющие интерес для администратора безопасности. Эта информация, наряду со стандартными отчетами программного обеспечения (ПО) управления антивирусной защитой, может использоваться для более качественного управления антивирусными клиентами.

В качестве примера рассмотрим такие задачи интеллектуального анализа данных, как кластеризация и классификации.

## Кластеризация

Формально задача кластеризации описывается следующим образом [1]. Дано множество объектов данных $I$, каждый из которых представлен набором атрибутов. Требуется построить множество кластеров $C$ и отображение $F$ множества $I$ на множество $C$, то есть $F\colon I \to C$. Количество кластеров может быть заранее неизвестно. Качество решения задачи определяется количеством верно классифицированных (отнесенных к правильному кластеру) объектов данных.

Множество $I$ определим следующим образом:

$$I = \{i_1, i_2, \ldots, i_j, \ldots, i_n\},$$

где $i_j$ – исследуемый объект.

Каждый из объектов характеризуется набором параметров:

$$i_j = \{x_1, x_2, \ldots, x_h, \ldots, x_m\}.$$

Каждая переменная $x_n$ может принимать значения из некоторого множества:

$$x_h = \{v_h^1, v_h^1, \ldots\}.$$

Задача кластеризации состоит в построении множества кластеров:

$$C = \{c_1, c_2, \ldots, c_k, \ldots, c_g\}.$$

где $c_k$ – кластер, содержащий похожие друг на друга (близкие, в соответствии с введенной мерой) объекты из множества $I$:

$$c_k = \{i_j, i_p \mid i_j \in I, i_p \in I, d(i_j, i_p) < \sigma\},$$

где $d(i_j, i_p)$ – мера близости между объектами, называемая расстоянием. Если расстояние $d(i_j, i_p)$

меньше некоторого значения σ, то считается, что объекты близки, и они помещаются в один кластер.

В рассматриваемой задаче анализа данных, собираемых ПО управления антивирусной защитой, кластеризация может позволить определить группы схожих по параметрам компьютеров, для которых можно ввести единые настройки (или политики) антивирусного клиента.

Допустим, анализ показал наличие группы устаревших компьютеров, пользователи которых работают с программой, создающей файлы большого размера. Проверка подобных файлов резидентным модулем антивирусной защиты существенно увеличивает время открытия и сохранения данных файлов, что вызывает претензии пользователей. Для этой группы компьютеров может быть принято решение об исключении файлов данного типа из списка проверяемых.

### Прогнозирование

Формально задачу прогнозирования можно описать следующим образом [1]. Имеется множество объектов:

$$I = \{i_1, i_2, \ldots, i_j, \ldots, i_n\},$$

где $i_j$ – исследуемый объект. Каждый объект характеризуется набором переменных:

$$i_j = \{x_1, x_2, \ldots, x_h, \ldots, x_m, y\},$$

где $x_h$ – независимые переменные (их значения известны), на основании которых надо определить значение зависимой переменной $y$. Можно обозначить набор независимых переменных вектором $X$:

$$X = \{x_1, x_2, \ldots, x_h, \ldots, x_m\}.$$

Каждая переменная может принимать значения из некоторого множества. Если множество значений зависимой переменной $y$ – конечное, то речь идет о задаче прогнозирования значения дискретного атрибута, также называемой задачей классификации.

В рассматриваемой предметной области может представлять интерес решение задачи прогнозирования уровня подверженности конкретного компьютера вирусным атакам. Например, при прочих равных условиях, более подвержены заражениям общедоступные компьютеры, которые подключены к Интернет, и на которых разрешено использование съемных носителей. Обучив модель интеллектуального анализа на имеющихся примерах, можно по описанию роли компьютера, его размещения, работающих с ним пользователей, списка установленного ПО и прочих подобных параметров, предсказать, насколько данный компьютер может быть подвержен вирусным инцидентам. В зависимости от результата, можно предпринять какие-то административные меры, например, применить на антивирусном клиенте более или менее жесткую политику.

### Экспериментальные результаты

Для того чтобы проверить выдвинутые предположения, применялась база данных (БД) Kaspersky Security Center – средства централизованного администрирования антивирусных продуктов «Лаборатории Касперского». В качестве системы управления базами данных (СУБД) Security Center использует Microsoft SQL Server, поэтому было решено использовать встроенные средства интеллектуального анализа данных этой СУБД. В работе использовался MS SQL Server 2008 R2 в редакции developer.

Решение задачи кластеризации в MS SQL Server 2008 может выполняться с помощью алгоритмов *k*-средних («жесткая» кластеризация, каждый элемент относится только к одному кластеру) и максимизации ожидания («мягкая» кластеризация, элемент может относиться к нескольким кластерам с разными вероятностями) [2]. Задача классификации может быть решена алгоритмами деревьев решений, нейронных сетей, логистической регрессии (в реализации Microsoft это вариант алгоритма нейронных сетей, формирующий сеть без скрытого слоя), упрощенным алгоритмом Байеса. Также данная задача может быть решена с помощью алгоритма кластеризации, когда значение прогнозируемого атрибута сначала рассматривается как неопределенное, а после выбирается наиболее характерное значение для кластера, к которому отнесен данный элемент.

В ходе выполнения работы был проведен анализ данных, собираемых сервером управления антивирусной защитой Kaspersky Security Center 9.0, развернутым в сети кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Защищаемая сеть включает два компьютерных класса, компьютеры преподавателей, три постоянно работающих сервера и два сервера, включае-

мых на время лабораторных работ. Расположение компьютеров частично отображено на структуру групп администрирования Security Center.

На управляемых Security Center компьютерах сети используется антивирусное ПО Kaspersky Endpoint Security 8.0. Кроме этого, в сети присутствует около 20 кафедральных компьютеров с антивирусным ПО других производителей, а также периодически подключаемые в кафедральную сеть личные ноутбуки сотрудников и студентов. Информация о них также попадает в базу, но является неполной, и это нужно учитывать в процессе анализа (записи о таких хостах отфильтровывались при обучении и анализе модели). Анализируемая БД содержит записи о 118 хостах, 29 из которых управляются Security Center.

Нужно отметить, что полная документация на БД Security Center пользователям не предоставляется. Для конечного пользователя предназначены формируемые этим ПО стандартные отчеты, которые достаточны для обычных задач администрирования, но в рассматриваемом случае малопригодны. Но в этой БД определены несколько «публичных» представлений (view), документация на которые поставляется с продуктом. Данные этих представлений и использовались при определении источника данных для анализа. К ним относятся:

данные о группах компьютеров (группах администрирования Security Center) и их иерархии;

сведения о компьютерах (хостах) – имя, домен, операционная система, дата и время, когда хост был доступен, дата и время последнего обновления антивируса, и другие подобные данные;

информация о текущем статусе хоста с точки зрения антивирусной защиты – идентификатор статуса (0 – OK; 1 – Warning; 2 – Critical) и расширенное описание состояния антивирусного ПО и агента администрирования антивирусного ПО;

перечень событий на хостах – обнаружен вирус, обнаружена сетевая атака, инфицированный объект вылечен и т. д.;

информация о приложениях, установленных на управляемых хостах, их обновлениях, используемой аппаратуре.

При выполнении интеллектуального анализа данных с помощью аналитических служб MS SQL Server можно сначала создать структуру интеллектуального анализа, а потом в ее рамках – одну или несколько моделей. В структуре описывается перечень анализируемых параметров, их тип данных и тип содержимого (например, числовое непрерывное или числовое дискретное значение). Определение модели включает указание на используемый алгоритм, его параметры, фильтры, применяемые к данным этой модели. После этих определений исходные данные загружаются в структуру и появляется возможность обработать их с помощью алгоритма интеллектуального анализа – обучить модель. Выявленные в результате обучения закономерности сохраняются в модели и могут использоваться для последующего анализа и прогнозирования. При необходимости часть данных может резервироваться в структуре для целей тестирования – они не используются при обучении модели.

Для анализа исходного набора с помощью алгоритма кластеризации создана структура данных и в ней определено несколько моделей, одни из которых использовали алгоритм максимизации ожидания, другие – *k*-средних, с разными параметрами. В настройках алгоритмов устанавливалось число формируемых кластеров равное 2, 3, 4, 5, 6 и 0 (число кластеров определяется алгоритмом эвристически). Явно задавать более шести кластеров не представлялось целесообразным из-за малого объема исходных данных: число управляемых Security Center компьютеров в исследованной БД равно 29.

По результатам сделан выбор в пользу алгоритма максимизации ожидания с формированием четырех кластеров. Визуальный анализ результатов обучения модели можно сделать с помощью ряда встроенных графических средств. В частности, это диаграммы «профилей» кластеров, показывающие характерные для кластера значения каждого из атрибутов. Один из таких атрибутов – число обнаруженных вирусных инцидентов nVirusCount (данные брались за период времени около трех месяцев). Фрагмент диаграммы профилей кластеров для выбранной модели приведен на рис. 1.

На рисунке видно, что в кластерах 2 и 4 оказались компьютеры с низким (менее трех) числом вирусных инцидентов, а в кластерах 1 и 3 – число заражений обычно больше. При этом невылеченные объекты (nUncured) имеются только на компьютерах, принадлежащих кластеру 1.

В связи с тем что задача кластеризации является описательной, большинство средств оценки точности к моделям кластеризации неприменимы. Из предоставляемых MS SQL Server 2008

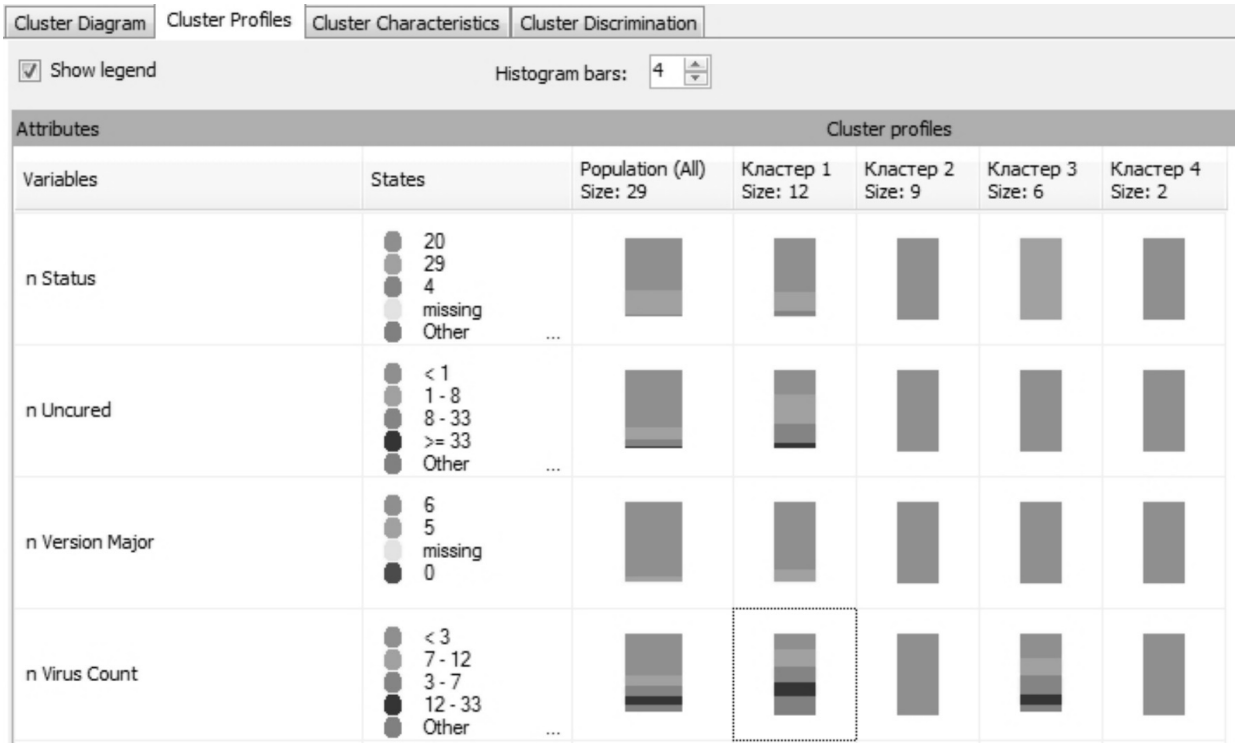



Рис. 1. Диаграмма профилей кластеров

инструментов можно воспользоваться только перекрестной проверкой (cross validation). Суть ее заключается в том, что множество вариантов, которое использует модель, разбивается на непересекающиеся подмножества (разделы). Для каждого из разделов производится обработка модели и полученные результаты сравниваются с теми, что были на исходном множестве вариантов. Если результаты близки, можно говорить об удачной модели интеллектуального анализа: результат прогноза или анализа достаточно стабилен. На рис. 2 представлены результаты перекрестной проверки для случая, когда исходное множество вариантов разбивалось на три подмножества.

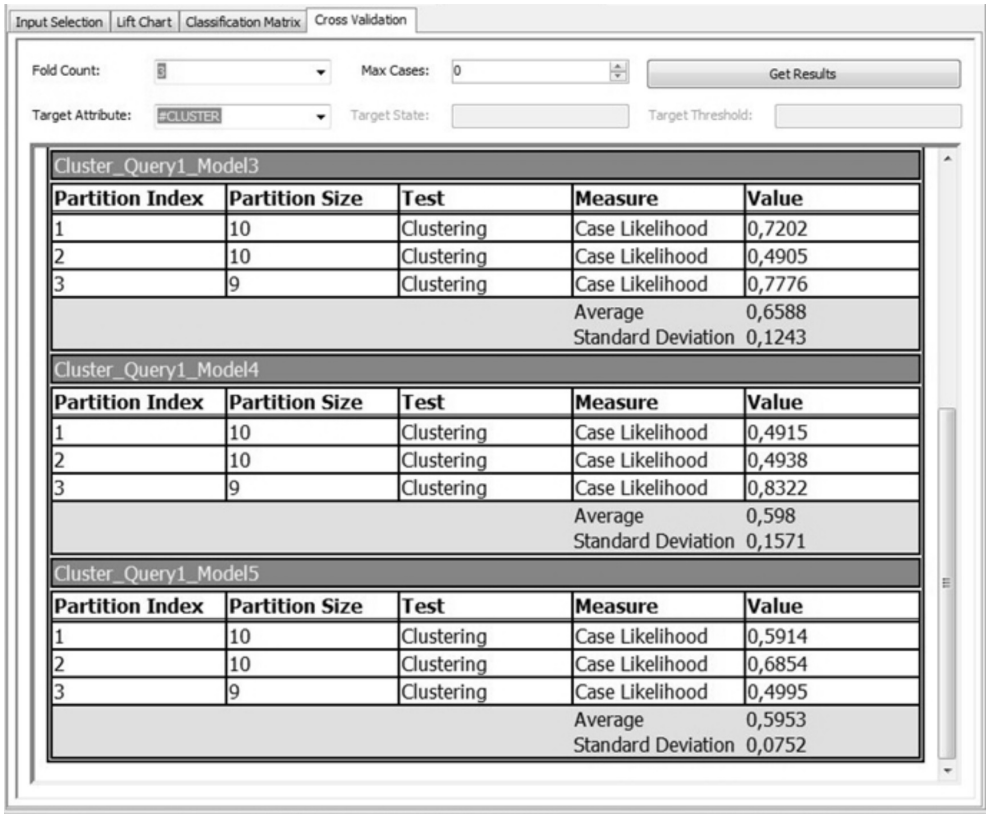
Использование большего числа разделов не представляется обоснованным из-за малого объема исходных данных. Из рисунка видно, что выбранная модель Cluster_Query1_Model3 показывает наилучший результат – около 66 % совпадений в результатах кластеризации исходного множества и в рамках разделов. Здесь также следует учитывать, что для анализа имелось всего 29 элементов.

Кроме редакторов интегрированной среды разработки BI Development Studio, работа с моделью может производиться и с помощью SQL-подобного языка DMX (data mining eXtensions).

Запрос, позволяющий получить информацию о компьютерах, которые были отнесены к первому кластеру (условие IsInNode('001')), будет выглядеть следующим образом (выводится имя, число вирусных инцидентов, название группы администрирования и подпись «Cluster1»):

```
SELECT StructureColumn('Wstr Win Name') as HostName, [n Virus Count], [Wstr Name] as GrName, 'Cluster1' as Clust
FROM Cluster_Query1_Model3.CASES
WHERE IsInNode('001')
```

Анализ полученного списка хостов показал, что в этот кластер (наименее благополучный по числу вирусных инцидентов) попала большая часть компьютеров из учебного класса, где в основном занимаются студенты младших курсов. Результат можно объяснить следующим образом: за каждым компьютером регулярно работает много пользователей, часто используются съемные носители. В данном классе можно рекомендовать установить более жесткую политику для антивирусного клиента (проверка в режиме реального времени архивов, более частое полное сканирование системы, ограничение работы со съемными накопителями).




Cluster_Query1_Model3

| Partition Index | Partition Size | Test | Measure | Value |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,7202 |
| 2 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,4905 |
| 3 | 9 | Clustering | Case Likelihood | 0,7776 |
| | | | Average | 0,6588 |
| | | | Standard Deviation | 0,1243 |

Cluster_Query1_Model4

| Partition Index | Partition Size | Test | Measure | Value |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,4915 |
| 2 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,4938 |
| 3 | 9 | Clustering | Case Likelihood | 0,8322 |
| | | | Average | 0,598 |
| | | | Standard Deviation | 0,1571 |

Cluster_Query1_Model5

| Partition Index | Partition Size | Test | Measure | Value |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,5914 |
| 2 | 10 | Clustering | Case Likelihood | 0,6854 |
| 3 | 9 | Clustering | Case Likelihood | 0,4995 |
| | | | Average | 0,5953 |
| | | | Standard Deviation | 0,0752 |

Рис. 2. Результаты перекрестной проверки

В приведенном выше примере найденную зависимость можно было выявить и без использования data mining: администратор мог сделать соответствующее предположение и проверить его, просмотрев отчеты. Но здесь важно отметить, что перед проведением анализа средствами data mining никаких предварительных версий не было, и здесь работа алгоритмов анализа отчасти заменила профессиональную интуицию специалиста. Таким образом, даже для небольшого объема данных проведение кластеризации и анализ ее результатов позволили выявить полезные зависимости.

Аналогичный эксперимент с прогнозированием дискретного атрибута получился менее удачным. В процессе обучения основанной на алгоритме деревьев решений модели было получено сообщение, что «алгоритм не обнаружил разбиений для прогнозирующей модели». Другие алгоритмы (нейронных сетей, логистической регрессии, упрощенный алгоритм Байеса) по итогам тестирования показали низкую точность предсказания. По всей видимости, в данном случае сказался небольшой объем обучающей выборки: всего в используемом наборе находились данные о 29 компьютерах, причем часть из них резервировалась для целей тестирования.

Результаты работы показывают, что методы интеллектуального анализа данных позволяют выявить неявные зависимости, полезные для администратора антивирусной защиты. В частности, решение задачи кластеризации может указать на наиболее адекватный способ распределения компьютеров по группам администрирования.

Использование прогнозирующих моделей позволит, в подобном случае, отнести новый компьютер в наиболее подходящую группу администрирования. Но для обучения прогнозирующей модели необходима достаточная обучающая выборка данных, которую можно получить только в сети, включающей большое число защищаемых компьютеров. Анализ решения сходных задач, описанных в литературе [2, 3], позволяет надеяться на получение в подобном случае положительных результатов.

Работа проведена при поддержке ЗАО «Лаборатория Касперского» в форме гранта в рамках Программы поддержки инновационных проектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барсегян, А.А.** Анализ данных и процессов: Учеб. пособие [Текст] / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. –3-е изд., перераб. и доп. –СПб.: БХВ-Петербург, 2009. –512 с.

2. **Макленнен, Джеми.** Microsoft SQL Server 2008: Data mining – интеллектуальный анализ данных [Текст] / Джеми Макленнен, Чжаохуэй Танг, Богдан Криват; Пер. с англ. –СПб.: БХВ-Петербург, 2009. –720 с.

3. **Аникин, И.В.** Технология интеллектуального анализа данных для выявления внутренних нарушителей в компьютерных системах [Текст] / И.В. Аникин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 6 (113). –С. 112–117.

УДК 004.457

*А.А. Масюк, С.Э. Сараджишвили*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ТЕМАТИЧЕСКАЯ КАТЕГОРИЗАЦИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ КОНТЕНТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

*A.A. Masyuk, S.E. Saradgishvili*
*St.-Petersburg, Russia*

# THEME CATEGORIZATION RESOURCES IN THE CONTENT FILTERING

Изучены методы фильтрации и управления доступом к ресурсам сети Интернет и создание системы контентной фильтрации, которая должна предоставлять механизм распределения прав доступа к сетевым ресурсам, основанный на централизованной базе данных категоризированных Интернет-ресурсов и списках ключевых слов.

КОНТЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ. ФИЛЬТРАЦИЯ ПО КЛЮЧЕВЫМ СЛОВАМ. ДИНАМИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ. URL-ФИЛЬТРАЦИЯ. УПРАВЛЯЕМЫЙ ДОСТУП. ПОЛИТИКА ФИЛЬТРАЦИИ. ТЕМАТИЧЕСКАЯ КАТЕГОРИЗАЦИЯ.

The article covers investigation of filtering mechanisms and management of access to Internet-resources. The main purpose of this investigation is to develop the content-filtering system, which should provide the mechanism of access rights distribution to net-resources based on categorized and centralized data base of Internet-resources and key-words.

CONTENT FILTERING. FILTERING BY KEYWORDS. DYNAMIC FILTERING. URL-FILTERING. MANAGEMENT OF ACCESS. POLICY OF FILTRATION. THEME CATEGORIZATION.

Для решения задач обеспечения сетевой безопасности существует большой выбор межсетевых экранов, антивирусов и других программных и программно-аппаратных комплексов.

Однако недостаточно внимания и ресурсов уделялось проблеме управления доступом к формально безопасному, с точки зрения других компонент системы обеспечения безопасности, содержимому сайтов. Данную задачу решают при помощи контентной фильтрации, которая технологически реализуется различными способами, но конечная ее цель – изолировать пользователя от нежелательной информации. Контентная фильтрация может выполняться аппаратными и программными средствами.

Контентная фильтрация – это функция управления доступом пользователей к специфическим типам информации на основе анализа содержимого информационных объектов (веб-запросы пользователей, содержимое веб-страниц) и определения соответствия их параметров принятой политике безопасности [1, 2]. Под политикой безопасности понимается набор правил по доступу к ресурсам сети, которые назначаются для пользователей и групп пользователей.

Система контентной фильтрации (СКФ) – это технологическое решение, основной задачей которого является предоставление сервиса управления доступом пользователей к ресурсам Интернет. СКФ отвечает за управление доступом пользователей к ресурсам Интернет в зависимости от категории запрашиваемых ресурсов и принятой организационной политики [1, 2].

Существующие СКФ хорошо работают с англоязычными ресурсами, но имеют ограниченные возможности работы с данными на других языках. В ситуации с русскоязычными ресурсами контентные фильтры имеют ряд существенных недостатков:

некорректная работа с русскоязычными ресурсами по причине отсутствия специальных инструментов работы с информацией на русском языке;

бедность базы данных категоризированных русскоязычных ресурсов.

Методы категоризации ресурсов в большинстве существующих СКФ имеют нелинейную сложность и чрезмерно требовательны к вычис-

лительным ресурсам. По этой причине большинство СКФ не могут категоризировать ресурсы при первом обращении: пользователь получает доступ, а ресурс категоризируется позже.

Во многих случаях методы категоризации требуют участия человека в проверке результатов для обеспечения приемлемого качества. Обычно участие человека в таких системах сводится к исключению из списков ресурсов, положительно категоризированных из-за несовершенства метода категоризации.

Распространенной ошибкой является определение ресурса как относящегося к категории, на основе единственного термина, встретившегося в тексте, несмотря на то что ресурс имеет тематику, существенно отличающуюся от тематики категории. Таким же образом ресурс может быть отнесен к нескольким категориям одновременно. В подобных методах проблемой является отсутствие интегрального показателя значимости, который позволил бы правильно соотносить ресурсы и категории.

Изложенные основания предопределяют актуальность исследования и разработки модели тематической категоризации, лишенной перечисленных недостатков.

Статья посвящена исследованию методов управления доступом к ресурсам сети Интернет и созданию модели тематической категоризации для системы контентной фильтрации. Система должна предоставлять механизм распределения прав доступа к сетевым ресурсам, основанный на централизованной базе данных категоризированных Интернет-ресурсов и списках ключевых слов (терминов).

Для разрабатываемой СКФ необходимо создать модель категоризации, инвариантную языку анализируемых ресурсов. Метод категоризации, лежащий в основе модели, должен иметь линейную сложность и минимизировать участие человека в оценке качества категоризации. Оценка должна быть формализована.

**Методы контентной фильтрации.** Существует большое количество методов контентной фильтрации. В СКФ обычно используется более одного метода, что необходимо для обеспечения лучших результатов работы системы, поскольку различные методы позволяют достигать требуемых результатов только на определенном типе фильтруемых данных. Однако можно выделить три наиболее общих класса методов фильтрации [2, 3]:

- фильтрацию с использованием справочников ключевых слов;
- фильтрацию на основе списков IP/URL;
- динамическую фильтрацию.

Фильтрация по ключевым словам – наиболее простой способ фильтрации, поэтому она часто применяется как отдельно (в простых системах для домашнего использования), так и в комбинации с другими методами фильтрации. Этот метод позволяет включать блокировку страницы либо сайта целиком при наличии в них слов или словосочетаний из справочника. Метод прост в реализации и использовании, но имеет существенный недостаток: он может блокировать ресурсы, в которых фильтруемые слова используются в другом контексте (т. н. избыточная фильтрация).

IP/URL-фильтрация позволяет блокировать ресурсы по справочнику IP-адресов или URL (возможен смешанный режим). Справочник может наполняться как вручную, так и автоматически, на основе алгоритма предварительного анализа ресурсов.

Динамическая фильтрация – широкий класс методов, в которых содержимое ресурса анализируется в момент поступления запроса к ресурсу. Доступ к ресурсу блокируется, если его содержимое определяется как несоответствующее политике безопасности.

Основное отличие IP/URL-фильтрации и динамической фильтрации заключается в моменте анализа содержимого ресурса и поведении системы в случае, когда при первом обращении ресурс не классифицирован системой.

**Сравнение существующих систем контентной фильтрации.** В таблице приведено сравнение наиболее распространенных СКФ по ряду наиболее важных критериев (по принципу наличия или отсутствия функциональности).

Из обзора существующих решений можно сделать вывод, что имеются системы различного класса и различной функциональности, но нет единого подхода к реализации одних и тех же функциональных возможностей даже среди систем одного класса.

Лидирующие системы контентной фильтрации основываются на принципе анализа и категоризации Интернет-ресурсов, что признано наиболее эффективным методом фильтрации нежелательных данных. Эти системы используют регулярно обновляемые базы URL, гибкие

**Сравнение систем контентной фильтрации**

| Критерий | Дозор-Джет | Dans-Guardian | Smooth-Guard-ian | Cyber Patrol | Cyber Snoop | Net Nanny | Cyber Sitter | Wiz-guard | Cyber Sentinel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фильтрация по IP/URL | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Фильтрация по терминам входящих данных | + | + | + | + | + | - | - | - | + |
| Фильтрация по терминам исходящих данных | + | - | - | - | + | - | - | + | + |
| Фильтрация по портам | + | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Наличие локальной БД | + | + | + | + | + | + | + | - | + |
| Наличие центральной БД | + | - | - | + | + | + | + | + | + |
| Установка на рабочую станцию | - | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Установка на шлюз | + | + | + | - | - | - | - | - | - |
| Управление временем работы | + | - | + | + | - | - | - | - | - |
| Сбор статистики | + | - | + | + | + | + | + | + | + |
| Встроенная поддержка русского языка | + | - | + | - | - | - | - | - | - |
| Наличие графического интерфейса | - | - | - | + | + | + | + | + | + |

настройки фильтра и развитые системы отчетности.

Все рассмотренные системы фильтрации либо не используют центральные БД, либо используют закрытые БД ресурсов, свободный доступ к которым невозможен. Содержание таких БД обычно является наибольшей ценностью для компаний-разработчиков подобных систем.

На данный момент не обнаружено ни одной сколько-нибудь полной БД русскоязычных ресурсов со свободным доступом. По этой причине было принято решение о создании собственной БД и разработке системы тематической категоризации, которая будет наполнять эту БД и поддерживать ее в актуальном состоянии.

**Определение тематической категоризации ресурсов.** Категория – группа, к которой может быть отнесен сайт на основе некоторых признаков. Категории представлены иерархическим деревом, а в простейшем случае – списком. Категоризация Интернет-ресурсов осуществляется специальной системой тематической категоризации, предоставляющей данную информацию клиентам СКФ [2].

На данный момент можно выделить несколько основных видов категоризации ресурсов:

- использование регулярно обновляемых баз данных категоризированных ресурсов (система категоризации работает со списком категорий, категоризирует новые ресурсы и обновляет связи между категориями и существующими ресурсами);
- категоризация данных «на лету» путем анализа содержимого страниц;

• использование данных о категории, информацию о принадлежности к которой предоставляет сам сайт.

Категоризация данных и формирование баз категорий обычно производится в полуавтоматическом режиме – сначала выполняются анализ содержимого и определение категории с помощью специально разработанных средств. На втором этапе полученная информация часто проверяется людьми, принимающими решение о том, к какой категории можно отнести тот или иной сайт.

Многие компании автоматически пополняют базу категорий по результатам работы клиентов, если обнаруживается сайт, не отнесенный ни к одной из категорий.

В настоящее время используются два основных способа подключения предопределенных баз данных категоризированных ресурсов:

• использование локальной базы категорий с регулярным ее обновлением (данный метод очень удобен для больших организаций, имеющих выделенные серверы фильтрации и обслуживающие большое количество запросов);

• использование базы категорий, размещенной на удаленном сервере (данный метод часто применяется в различных устройствах – межсетевых экранах, ADSL-модемах и т. п.

Использование удаленной базы категорий немного увеличивает нагрузку на каналы связи, но обеспечивает использование актуальной базы категорий.

Стоит заметить, что эти два метода можно удачно скомбинировать, используя центральную базу и небольшой временный список ссылок на клиенте.

К преимуществам применения предопределенных баз категорий можно отнести то, что предоставление или запрет доступа производится еще на этапе выдачи запроса клиентом, что может существенно снизить нагрузку на каналы передачи данных. А главный недостаток использования данного подхода – задержки в обновлении баз категорий сайтов, поскольку для анализа требуется некоторое время. Кроме того, некоторые сайты часто меняют свое наполнение, из-за чего информация о категории, хранящаяся в базе адресов, становится неактуальной. Некоторые сайты также могут предоставлять доступ к разной информации, в зависимости от имени пользователя, географического региона, времени суток и т. п.

Далее будет выполнен обзор нескольких существующих моделей тематической категоризации и приведена новая модель, базирующаяся на методе вычисления относительной значимости терминов.

**Простейшая модель категоризации.** Тематический профиль – это совокупность данных (перечень терминов), необходимая для принятия решения о принадлежности документа на основе анализа его текстовых данных к заданной категории.

Под термином понимается слово, словосочетание, логическая формула из слов и словосочетаний, содержащая логические операторы.

При автоматическом построении профиля в качестве терминов синтезируются только слова и словосочетания. Кроме того, при автоматическом построении профиля не синтезируются перечни терминов-исключений, когда документ автоматически относится или исключается из категории. Эти операции должен осуществлять эксперт на основе анализа результатов категоризации.

Перед началом категоризации проводится очистка ресурса: удаляется навигационная часть, теги html и скрипты. В случае более глубокого анализа возможно удаление слов, не несущих смысловой нагрузки [4].

Пусть дан ресурс $D$, представимый как множество элементов текста $D = \{d_k\}$ и категория $C$, состоящая из двух подмножеств $D = \{Ca, Cb\}$, где $C = \{Ca_i\}$ – множество терминов, которые должны присутствовать в ресурсе $D$ для его отнесения к категории $C$; $Cb = \{Cb_j\}$ – множество терминов, которые должны отсутствовать в ресурсе $D$ для его отнесения к категории $C$. Вычислив количество элементов в пересечениях множеств $|D \cap Ca| = Ra$ и $|D \cap Cb| = Rb$, можно сделать вывод о принадлежности ресурса к категории: если $Ra > \tau$ и $Rb < \vartheta$, то ресурс $D$ относится к категории $C$. Пороговые значения $\tau$ и $\vartheta$ задаются экспертом, либо вычисляются в процессе обучения.

Представленная модель применялась ранее в системах, предназначенных для домашнего использования. Системы, реализующие данную модель, нетребовательны к вычислительным ресурсам и легко администрируются. Основной проблемой является невозможность учета количества вхождений термина в текст ресурса и веса термина, – все термины имеют одинаковый приоритет, что часто не соответствует требованиям, предъявляемым к системам фильтрации.

**Семантическая категоризация.** Семантический анализ – процесс выявления смыслового содержания слов и словосочетаний в предложении. Семантический анализ обеспечивает нормализацию синтаксической структуры предложений, распознавание терминов, классификацию терминов по семантическим признакам, с учетом синонимических и гипонемических (отношение «общее – частное») классов, выявление определений терминов.

Степень соответствия найденных документов запросу пользователя характеризуется понятием *релевантность*. Оно не является специфичным для систем информационного поиска. Это понятие появилось из философских теорий, объясняющих относительную связь между источниками информации, и изучается многими направлениями науки. Для организации наиболее релевантного поиска предлагается использовать онтологии.

Онтологии являются новыми интеллектуальными средствами для поиска ресурсов в сети Интернет, новыми методами представления и обработки знаний и запросов. Они способны точно и эффективно описывать семантику данных для некоторой предметной области и решать проблему несовместимости и противоречивости понятий [5, 6].

Формально определим онтологию как множество $O=(L,C,F_l,F_c,R_h)$, где $L=\{(w_i,x_i)\}_{i=1,n}$ – словарь терминов предметной области; $w_i$ – термин; $x_i$ – рейтинг термина $w_i$ относительно других терминов в категории $C=\{c_i\}_{i=1,m}$; $F_l(L)\to C$ – функция интерпретации терминов; $F_c(c_i)\to L$ – функция интерпретации категорий; $R_h$ – отношения иерархии между категориями (концепциями) в онтологии.

Запрос на определение соответствия ресурса категории представляется в виде множества терминов из $L$: $u=\bigcup_m w_m$.

Итоговая формула для $P(c_i\,|\,u)$ выглядит следующим образом [7]:

$$P(c_i\,|\,u)=\sum_{w\in u}\left(\frac{P(w\,|\,c_i)}{\sum_{c'\in C}P(w\,|\,c')}\cdot\frac{count(w,L)}{\sum_{w'\in u}count(w',L)}\right),$$ где

$P(w\,|\,c_i)=x_w^i$ – вероятность вхождения термина $w$ в категорию $c_i$, вес данного термина в данной категории; $count(w, L)$ – отношение количества вхождений термина $w$ к общей сумме вхождений всех терминов.

Основными недостатками семантических методов категоризации является их привязка либо к определенному языку, либо к группе языков. В приведенной выше модели для каждого языка требуется составление онтологии по каждой группе связанных категорий. Для других подходов семантической категоризации нередко требуется разработка отдельных моделей для групп языков, пример такой системы – POESIA [8].

Следует отметить, что системы фильтрации на основе семантической категоризации дают очень хорошие результаты для тех групп языков, для которых они были разработаны (около 98 % ресурсов категоризируются правильно).

**Тематическая категоризация на основе вычисления весовых коэффициентов терминов, принадлежащих категории.** Пусть дано множество ресурсов $D$, разделенное на два непересекающихся подмножества $T_r$ и $T_s$, называемые *обучающей* и *тестовой выборкой*. На основании обучающей выборки строится классификатор категорий, а на тестовой выборке проверяется качество категоризации. Пусть также дано соответствие между ресурсами и категорией $C$ в виде $\Phi : D \to \{0,1\}$, устанавливающее значение 1, в случае, если ресурс принадлежит категории и нуль – в противоположном случае [9, 10].

Используя подмножество $T_r$ необходимо построить функцию $\Phi':D\to\{0,1\}$, аппроксимирующую $\Phi$ так, чтобы число ошибок на $T_s$ было наименьшим: $E=\sum_{T_s}|\,\Phi-\Phi'\,|\to\min$.

Пусть $T$ – множество терминов, выделенное из ресурса категории $C$. Тогда ресурс можно представить в виде вектора $d_j=(w_{1j},\,...,\,w_{|T|j})$, где $w_{ij}\in[0,1]$ – нормированный вес термина $t_i$ в ресурсе $d_j$. В таком случае, категорию можно представить в виде вектора той же размерности, что и вектор ресурса: $C=(c_1,\,...,\,c_{|T|})$, где $c_i$ – вес термина $t_i$ в категории $C$ [11].

Для получения веса термина используется частотный метод вычисления степени соответствия $w_{ij}=\frac{T_{i,j}}{|\,T_i\,|}\cdot\frac{|\,D\,|}{|\,D_j\,|}$, где $T_{i,j}$ – число терминов $t_i$ в ресурсе $d_j$; $T_i$ – общее число терминов в ресурсе $d_j$; $D_j$ – число ресурсов, в которых встречается термин $t_i$; $D$ – общее количество ресурсов категории, $i\in[1,D]$, $j\in[1,T]$. Таким образом, чем чаще термин встречается на странице некоторого ресурса, но реже встречается во всех ресурсах, тем выше будет его вес в данном ресурсе.

Решение о принадлежности ресурса к категории будем принимать, если степень соответствия $CSV(c,d_j)=cd_j=\sum_i c_i d_{ij}$ достигнет некоторого порога τ. Таким образом, получаем: $\Phi'(c,d_j)=\begin{Bmatrix}1, & CSV(c,d_j)\ge\tau\\ 0, & CSV(c,d_j)<\tau\end{Bmatrix}$.

Основной проблемой для данной модели является процесс обучения, заключающийся в подборе весовых коэффициентов и порога, начальное значение которого должно задаваться экспертом. Оценка качества категоризации производится с использованием метрик информационного поиска, таких, как точность, полнота и *F*-мера [12]. Процесс обучения и уточнения коэффициентов должен производиться регулярно в связи с увеличением количества ресурсов, относимых к категориям. Методы подбора весовых коэффициентов обладают малой вычислительной масштабируемостью, что не позволяет использовать данную модель в больших системах.

**Разработанная модель тематической категоризации на основе метода вычисления относительной значимости терминов.** В основе разработанной модели категоризации [2] лежат законы Ципфа–Мандельброта [13]. Пусть дано множество ресурсов $D=\{d_i \mid i\in[1,M]\}$, каждый ресурс $d_i$ с точки зрения модели представляет собой множество терминов $d_i=\{t_j \mid j\in[1,N_i]\}$.

Далее рассмотрим статистические величины, отражающие информационную значимость терминов в множестве ресурсов. Частота встречаемости термина $t_j$ в ресурсе $d_i$: $DF(t_j,d_i)=\mathrm{Log}_2\dfrac{count(t_j,d_i)}{\sum_{n\in[1,N_i]} count(t_n,d_i)}$, где $count(t_j,d_i)$ – количество вхождений термина $t_j$ в ресурс $d_i$. Частота $DF(t_j,d_i)$ является вероятностью выбрать термин $t_j$ в ресурсе $d_i$ при случайном выборе всех вхождений терминов, имеющихся в тексте ресурса.

Инверсная частота встречаемости термина во множестве ресурсов определяет количество информации, получаемое при снятии неопределенности наступления события встречи термина в одном из ресурсов множества: $IDF(t_j,D)=\mathrm{Log}_2\dfrac{|D|}{|d\in D \mid t_j\in d|}$. Поскольку $\dfrac{|D|}{|d\in D \mid t_j\in d|}\ge 1$, то $IDF(t_j,D)\ge 0$. Для часто встречающихся терминов $IDF(t_j,D)$ близка к нулю, а для редких терминов она стремится слева к $\mathrm{Log}_2|D|$: $0\le IDF(t_j,D)\le \mathrm{Log}_2|D|$.

Рассмотрим подмножество текстов $D'\subset D$, представляющее собой тематическую группу ресурсов. Пусть $d'\in D'$ и $t_j\in d'$, тогда возможно вычислить величину тематической $IDF(t_j,D')$, а разность $\Delta I(t_j,D,D')=IDF(t_j,D)-IDF(t_j,D')$ определяет изменение информативности термина при отнесении $d'$ к множеству $D'$. Значения разности могут быть как положительными, так и отрицательными, а поскольку отнесение ресурса к тематическому множеству означает снятие информационной неопределенности относительно тематики документа, но не внесение большей неопределенности, то $\Delta IDF(t_j,D,D')$ можно записать следующим образом: $\Delta IDF(t_j,D,D')=\begin{cases}\Delta I(t_j,D,D'), & \Delta I(t_j,D,D')>0\\ 0, & \Delta I(t_j,D,D')\le 0\end{cases}$, тогда можно определить границы значений: $0\le\Delta IDF(t_j,D,D')\le IDF(t_j,D)$ [14].

Согласно [13, 15] под значимостью термина $t_j$ в ресурсе *d*, входящего в множество *D*, понимается величина $DFIDF(t_j,d,D)=DF(t_j,d)\cdot IDF(t_j,D)$. По аналогии рассмотрим $DFTIDF(t_j,d,D,D')=$ $=DF(t_j,d)\cdot\Delta IDF(t_j,D,D')$, которая характеризует значимость $t_j$ в ресурсе *d* с учетом того, что $d\subset D'$. Величину $DFTIDF(t_j,d,D,D')$ будем называть характеристикой относительной значимости. Поскольку $0\le\Delta IDF(t_j,D,D')\le IDF(t_j,D)$, то $DFTIDF(t_j,d,D,D')\le DFIDF(t_j,d,D)$.

Пусть задано множество категорий $C=\{c_k \mid k\in[1,N]\}$, Каждая категория представляет собой множество терминов $c_k=\{t_j\}$. Введем метакатегорию терминов, содержащихся во всех категориях $C'=\bigcup_{k\in[1,N]} c_k$. На этапе обучения для всех терминов должны быть рассчитаны $IDF(t_j,C')$ и $\Delta IDF(t_j,c_k,C')$.

Тогда мы можем вычислить суммарную относительную значимость терминов, содержащихся в ресурсе *d* по отношению к категории $c_k$: $S(d,c_k,C')=\sum_{t\in c_k\cap d} DFTIDF(t,d,c_k,C')$. Учитывая, что документ может не содержать все термины категории, можем записать нормированный вариант $SN(d,c_k,C')=\dfrac{S(d,c_k,C')}{\sum_{t\in d} DFIDF(t,d,C')}$, $0\le SN(d,c_k,C')\le 1$. Последнее соотношение позволяет использовать нормированную относи-

тельную значимость для принятия решения о категоризации ресурса: ресурс $d$ относится к категории $c_k$ тогда и только тогда, когда $SN(d, c_k, C') > \tau$, где $\tau$ – пороговое значение, задаваемое экспертом, либо определяемое автоматически в процессе обучения.

В статье предложена модель тематической категоризации, в основе которой лежит метод вычисления относительной значимости терминов.

Модель базируется на законах Ципфа–Мандельброта, инвариантных языку категоризируемых ресурсов, и предполагает практически полную автоматизацию процесса категоризации. Для обучения и работы системы требуется только множество категорий и обучающая выборка ресурсов для установки значения порога.

Оценку качества категоризации предложено осуществлять при помощи метрик информационного поиска, таких, как точность и полнота [12]. Вычисляя метрики, можно устанавливать оптимальное значение порога, которое может быть различным: в некоторых случаях потребность в доступе является наиболее важной, поэтому допустимы ложные срабатывания, т. е. полнота важнее точности. В случаях жесткого ограничения доступа точность важнее полноты.

Показано, что процедура категоризации имеет линейную сложность, трудоемкость линейно зависит от количества категорий и терминов. Это позволяет говорить о высокой скорости категоризации, что в свою очередь дает возможность рассматривать предложенную модель как универсальную: категоризация может производиться как на выделенном сервере, так и на локальных машинах пользователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Масюк, А.А.** Контентная фильтрация и управление доступом к ресурсам сети Интернет [Текст] / А.А. Масюк, С.Э. Сараджишвили // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Матер. XIV Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. –Т. 1. –С. 127–128.

2. **Масюк, А.А.** Контентная фильтрация и управление доступом к ресурсам сети Интернет в образовательных учреждениях [Текст] / А.А. Масюк, С.Э. Сараджишвили // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 4. –С. 153–162.

3. **Масюк, А.А.** Методы контентной фильтрации [Текст] / А.А. Масюк, С.Э. Сараджишвили // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Матер. XIV Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. –Т. 1. –С. 128–130.

4. **Некрестьянов, И.С.** Обнаружение структурного подобия HTML-документов [Текст] / И.С. Некрестьянов, Е.Ю. Павлова // Тр. IV Всерос. конф. RCDL'2002. –Дубна, 2002. –С. 38–54.

5. **Добров, Б.В.** Формирование базы терминологических словосочетаний по текстам предметной области [Текст] / Б.В. Добров, Н.В. Лукашевич, С.В. Сыромятников // Тр. V Всерос. науч. конф. Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции. – RCDL'2003. –СПб., 2003.

6. **Загоруйко, Н.Г.** На пути к автоматическому построению онтологии [Электронный ресурс] / Н.Г. Загоруйко, А.М. Налетов, И.М. Гребенкин. –Режим доступа: http://www.dialog-21.ru/Archive/2003/Zagorujko.htm

7. **Захарова, И.В.** Об одном подходе к реализации семантического поиска документов в электронных библиотеках [Текст] / И.В. Захарова // Вестник УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. –Уфа: Изд-во Уфимского государственного авиационно-техн. ун-та. –2009. –Т. 12. –№ 1 (30). –С. 133–138.

8. Website of POESIA Project [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.poesia-filter.org/

9. **Поляков, И.Е.** Опыт создания системы фильтрации агрессивного web-контента [Текст] / И.Е. Поляков // Тр. XII Всерос. науч.-метод. конф. Телематика 2005. –СПб: Изд-во СПбИТМО.

10. **Sebastiani, F.** Machine Learning in Automated Text Categorization [Электронный ресурс] / F. Sebastiani. –Режим доступа: http://nmis.isti.cnr.it/sebastiani/

11. **Свечников, С.В.** Высокорелевантный поиск и автоматическая категоризация ресурсов Интернета [Текст] / С.В. Свечников // Сб. Интернет-порталы: содержание и технологии. Вып. 4 / ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика». –М.: Просвещение, 2007. –С. 538–548.

12. **Поляков, П.Ю.** RCO на РОМИП 2006 [Текст] / П.Ю. Поляков, В.В. Плешко // Тр. IV семинара по оценке методов информационного поиска. –СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2003. –С. 72–79.

13. **Попов, А.** Поиск в Интернете – внутри и снаружи [Электронный ресурс] / А. Попов. –Режим доступа: http://www.citforum.ru/pp/search_03.shtml

14. **Тихомиров, И.А.** Метод динамической контентной фильтрации сетевого трафика на основе анализа текстов на естественном языке [Текст] / И.А. Тихомиров, И.В. Соченков // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер. Информационные технологии. –Новосибирск: НГУ, 2008. –Вып. 2. –Т. 6. –С. 94–100.

15. **Han, E.** Text Categorization Using Weight Adjusted k-Nearest Neighbor Classification [Text] / E. Han, G. Karypis, V. Kumar // Proc. of the 16th International Conf. on Machine Learning. –Denver, 1999. –P. 41–56.

УДК 519.7

*П.Н. Брунарский*
*Москва, Россия*

# ОБУЧЕНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДВИЖЕНИЮ ПО ТРАЕКТОРИИ СО СЛОЖНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

*P.N. Brunarskiy*
*Moscow, Russia*

# LEARNING MOBILE ROBOT FOR PATH MOTION WITH COMPLEX CONSTRAINTS

Описано применение локального метода адаптации ковариационной матрицы для обучения мобильного робота с частично известными параметрами выполнению различных маневров и движению по траектории со сложными ограничениями. Предложена итеративная модификация алгоритма, ускоряющая процесс обучения для траекторий большой длины.

ОБУЧЕНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ. ОГРАНИЧЕНИЯ. АДАПТАЦИЯ. МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ. ОПТИМИЗАЦИЯ. АДАПТАЦИЯ КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ.

This paper describes the application of a local method of the covariance matrix adaptation for learning mobile robot with a priory unknown parameters to perform various maneuvers and trajectory control motion with complex constraints. Proposed iterative algorithm modification that speeds up the learning process for long trajectories.

LEARNING. MOTION CONTROL. CONSTRAINTS. ADAPTATION. MOBILE ROBOT. OPTIMIZATION. COVARIANCE MATRIX ADAPTATION STABILITY. ADAPTATION.

Развитие вычислительной техники и портативных источников энергии обеспечило благоприятные условия для развития автономных малогабаритных мобильных роботов, решающих задачи военного, научного и промышленного значения. При этом во многих задачах, таких, как патрулирование и разведка территории, транспортировка грузов необходимо точное следование по заранее определенному маршруту.

Аналитическое решение задачи синтеза и оптимизации траекторного управления мобильным роботом требует знания большого количества параметров как самого робота, так и среды, в которой он находится. Для оптимального управления и обхода препятствий необходимо учитывать не только кинематические ограничения, связанные с геометрическими свойствами робота и объектов окружающей среды, но и динамические, вызванные тем, что в материальном мире действуют законы сохранения, а объекты обладают массой, импульсом, энергией и к ним приложены различные внешние силы.

При использовании мобильных роботов в реальной среде для решения практических задач данные, необходимые для построения модели, часто отсутствуют в силу невозможности их точного измерения, либо в случае динамического окружения, когда параметры среды меняются со временем и под воздействием различных процессов. Так, в процессе эксплуатации механического робота, наряду с запаздыванием по времени исполнительных устройств, могут происходить изменения его массово-инерционных параметров, например, при добавлении или сбросе груза, а также изменения характеристик самих исполнительных устройств – изменение давления в шинах и, как следствие, изменение реакции объекта управления на команды от управляющей системы. Следовательно, для корректного и эффективного выполнения поставленных задач необходима оперативная корректировка управляющих действий на основании данных, полученных в ходе работы.

Примерами задач, требующих адаптивного

управления, являются: движение колесного робота по некоторой траектории с использованием поперечного скольжения колес для выполнения маневров на большой скорости, например, таких, как поворот под прямым углом или «полицейский» разворот; управление беспилотным летательным аппаратом, например, вертолетом в процессе движения по определенной траектории с заданными значениями скоростей и ориентацией в пространстве.

### Существующие работы

Актуальность задачи синтеза траекторного управления подтверждается большим количеством подходов и научных работ [1–3]. Однако в большинстве подобных работ закон управления строится на основании динамических моделей, предполагающих точное знание динамических характеристик системы, что делает их неприменимыми для управления объектом с частично известными параметрами в плохо формализованной среде.

Для реализации адаптивного управления и решения проблемы неполноты знаний о системе используются искусственные нейронные сети или нейроноподобные системы управления [4–7]. С их помощью строятся нелинейные кинематические и динамические модели объекта управления, либо адаптируются и уточняются модели, построенные аналитически. Так, в [4] используется персептрон с одним скрытым слоем для адаптации эталонной модели динамики к реальным управляющим устройствам летательного аппарата. В работах [5, 6] нейроноподобная система управления используется для распознавания образов состояний, в которых оказался объект управления, и для сопоставления этим образам одного из заранее определенных действий, выполнение которого улучшает «эмоциональную» (качественную) оценку состояния робота.

У нейронных сетей есть ряд существенных недостатков, ограничивающих их широкое применение в системах управления [7]: эффект забывания, возникающий при попытке дообучить обученную раннее сеть; сложность формирования обучающей выборки; длительное обучение, требующее значительных вычислительных ресурсов; проблема создания динамических нейронных сетей.

Рассматриваемую задачу траекторного управления можно сформулировать как задачу нахождения управляющего вектора, минимизирующего отклонение положения робота в фазовом пространстве относительно заданной траектории, другими словами – нахождение минимума штрафной функции. Для большинства реальных задач штрафные функции являются нелинейными, невыпуклыми, плохо обусловленными и высокой размерности $N > 10$, что делает применение методов, основанных на производных, невозможным, либо неэффективным, особенно в случае отсутствия динамической модели робота или при наличии дополнительных ограничений на решение. Среди методов оптимизации без использования производных одним из наиболее стабильных и эффективных является алгоритм адаптации ковариационной матрицы CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) [8, 9] и его модификация Basin-CMA [10], позволяющая учитывать ограничения, наложенные на решение задачи.

В данной статье рассматривается применение алгоритма Basin-CMA для решения задачи траекторного управления автономным мобильным роботом и его обучения выполнению различных маневров, а также предложен подход, увеличивающий скорость обучения.

### Математическая модель

Без ограничения общности рассматривается плоское движение четырехколесного робота, состояние которого описывается координатами в фазовом пространстве $\vec{s} = (x, y, \theta, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})^{\mathrm{T}}$, где $x$ и $y$ – декартовы координаты некоторой точки робота $C$ (рис. 1), например, геометрического центра или центра одной из колесных осей, а $\theta$ – ориентация робота, угол между продольной осью робота и положительным направлением оси $OY$.

Управление роботом дискретно и осущест-

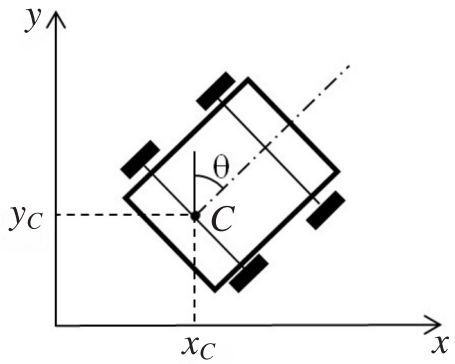



Рис. 1. Координаты робота

вляется с фиксированным временным квантом управления $\Delta t$. На каждом такте управления робот выполняет действия, описываемые вектором $\vec{d} = (d_1, d_2, ..., d_M)^{\mathrm{T}}$, где $M$ – количество исполнительных устройств. Для каждого исполнительного устройства определено линейно упорядоченное множество допустимых действий $D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, ..., d_{ik_i}\}$, $i = \overline{1, M}$, где $k_i$ – количество возможных действий, а порядок элементов определяется величиной воздействия на объект управления. Целевая траектория задается в виде множества точек $T = \{s_0, s_1, ..., s_F\}$ в фазовом пространстве, описывающих, в каком состоянии должен находиться робот в заданные моменты времени, $s_0$ – начальное состояние, $s_F$ – конечное.

Рассматривается задача нахождения вектора управления $\vec{u} = (\vec{d}_1, \vec{d}_2, ..., \vec{d}_N)^{\mathrm{T}}$, минимизирующего отклонение реализуемой траектории робота относительно заданной. Здесь $N$ – количество тактов управления, зависящее от длины траектории (времени, отведенного на ее прохождение) и длительности временного кванта между тактами управления.

В разных задачах отклонение может определяться и рассчитываться различными способами. В данной статье, без ограничения общности, в качестве отклонения эмпирической траектории от целевой рассматривается среднее квадратическое отклонений по евклидовой норме реальных фазовых координат робота относительно заданных.

Задача определения координат робота в настоящей статье не рассматривается. Предполагается, что робот оснащен всеми необходимыми сенсорами для определения его положения, ориентации в пространстве и скорости перемещения.

### Описание алгоритма Basin-CMA

Алгоритм адаптации ковариационной матрицы с бассейном (Basin-CMA) [10] создан на базе алгоритма CMA [8]. Его главным отличием от предшественника является возможность учитывать дополнительные ограничения, наложенные на решение задачи, например, такие, как дискретность множества решений и соблюдение кинематических и динамических ограничений при движении робота. Алгоритм адаптации ковариационной матрицы разработан Хансеном [8], как эволюционная стратегия для адаптации мутационного распределения на протяжении смены поколений. Каждая его итерация состоит из трех шагов.

1. Генерация популяции из $\lambda$ нормально распределенных векторов размерности $n$:

$$\vec{x}_i^{(g+1)} = \vec{m}^{(g)} + \sigma \vec{z}_i, \ \vec{z}_i \in N(0, C^{(g)}), \ i = \overline{1, \lambda},$$

где $g+1$ – номер текущей итерации; $\vec{m}^{(g)} \in \mathbb{R}^n$ – вектор математического ожидания; $\sigma \in \mathbb{R}_+$ – размер шага – коэффициент, управляющий масштабом разброса векторов в популяции; $C^{(g)} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симметричная, положительно определенная матрица ковариаций, полученная на итерации $g$.

2. «Селекция и мутация». Для каждого из полученных векторов $\vec{x}_1^{(g+1)}, \vec{x}_2^{(g+1)}, ..., \vec{x}_\lambda^{(g+1)}$ вычисляется значение целевой функции $f$ и выбираются $\mu < \lambda$ «элитных» векторов, наилучшим образом минимизирующих целевую функцию, т. е. вектора, на которых целевая функция принимает наименьшие значения по сравнению с остальными. Элитные вектора упорядочиваются в порядке возрастания значений функции $f$:

$$f(\vec{x}_{1:\lambda}^{(g+1)}) \le f(\vec{x}_{2:\lambda}^{(g+1)}) \le ... \le f(\vec{x}_{\mu:\lambda}^{(g+1)}).$$

С каждым элитным вектором связывается вес:

$$\omega_j = \frac{\ln(\mu+1) - \ln j}{\mu \ln \mu - \ln \mu!}, \ j = \overline{1, \mu}.$$

Веса выбираются таким образом, чтобы больший вес был у вектора, для которого значение целевой функции минимально. Возможно использование и других схем расчета весов при выполнении условий $\omega_1 \ge \omega_2 \ge ... \ge \omega_\mu > 0$ и $\sum_{k=1}^{\mu} \omega_k = 1$.

Используя найденные элитные вектора и их веса, вычисляется новый вектор математического ожидания:

$$\vec{m}^{(g+1)} = \sum_{j=1}^{\mu} \omega_j \vec{x}_{j:\lambda}^{(g+1)}.$$

3. Адаптация ковариационной матрицы в соответствии с полученными результатами:

$$C^{(g+1)} = (1 - c_{\mathrm{cov}}) C^{(g)} +$$

$$+ c_{\mathrm{cov}} \sum_{j=1}^{\mu} \omega_j (\vec{x}_{j:\lambda}^{(g+1)} - \vec{m}^{(g)})(\vec{x}_{j:\lambda}^{(g+1)} - \vec{m}^{(g)})^{\mathrm{T}},$$

где $c_{\mathrm{cov}} \in (0,1)$ – параметр, задающий скорость обучения.

Более подробно алгоритм CMA-ES описан в работах [8, 9]. Выполнение алгоритма продолжается до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение или не будет достигнут наперед

заданный максимум количества итераций. В ходе работы алгоритма математическое ожидание нормального распределения стремится к глобальному минимуму функции.

В Basin-CMA помимо основных параметров алгоритма CMA и целевой функции $f$ задается множество ограничений вида $\phi_i(x) = 0 : i \in \overline{1,l}$ и $\psi_j(x) \le 0 : j \in \overline{l+1,m}$. Каждый вектор $\vec{x}_i, i = \overline{1,\lambda}$, сгенерированный на первом этапе, проецируется на эти ограничения, полученные проекции используются на втором и третьем шаге алгоритма. Под проекцией подразумевается ближайший по евклидовой норме вектор, удовлетворяющий всем ограничениям.

Несмотря на высокую скорость сходимости метода Basin-CMA, его применение в чистом виде для задач высокой размерности с эмпирическим вычислением целевой функции является ресурсоемким. Например, для обучения двухколесного робота движению по криволинейной траектории в форме синусоиды в течение 50 с при длине временного кванта управления 0,5 с и двух исполнительных устройствах, размерность искомого вектора составляет 200 элементов. Поиск вектора управления, реализующего движение по описанной траектории с максимальным отклонением по координатам, не превышающем 0,1 м при движении со скоростью 1 м/с, требует примерно 350 итераций, на каждой из которых целевая функция вычисляется по 19 раз.

Такое количество итераций приемлемо для компьютерной модели и числовых расчетов, но является большим для механического робота в реальных условиях, когда «вычисление» значения целевой функции для заданного вектора управления является применением этого вектора для управления в процессе движения и фиксацией состояний робота в заданные моменты времени. Подобное эмпирическое вычисление требует значительного количества ресурсов. Следовательно, для решения практических задач необходимо снижение количества итераций.

### Итеративный подход

В основе предлагаемого подхода лежит разбиение исходной траектории на небольшие отрезки, для каждого из которых размерность вектора управления $10 \le n \le 20$. Методом Basin-CMA ищется управление для первого отрезка. Затем, используя полученное решение, ищется вектор управления для участка траектории, соответствующего первым двум отрезкам, и т. д. до тех пор, пока не будет получен вектор управления заданной длины и реализующий целевое поведение. Рассмотрим алгоритм поиска более подробно.

Начальный вектор управления $\vec{u} = (\vec{d}_1, \vec{d}_2, ..., \vec{d}_N)^{\mathrm{T}}$ разбивается на $k = \left\lceil \frac{N}{p} \right\rceil$ частей малой размерности $p \in [5,10]$:

$$\vec{u}_1 = (\vec{d}_1, \vec{d}_2, ..., \vec{d}_p)^{\mathrm{T}},\ \vec{u}_2 = (\vec{d}_{p+1}, \vec{d}_{p+2}, ..., \vec{d}_{2p})^{\mathrm{T}},\ \ldots,$$
$$\vec{u}_k = (\vec{d}_{(k-1)p+1}, \vec{d}_{(k-1)p+2}, ..., \vec{d}_N)^{\mathrm{T}}.$$

На первом шаге ищется управление $\tilde{\vec{u}}_1$ для участка траектории, соответствующего первым $p$ тактам управления. Для этого методом Basin-CMA решается задача оптимизации штрафной функции размерности $pM$, где $M$ – количество исполнительных устройств. В качестве начального вектора математического ожидания используется вектор $\vec{u}_1$ и единичная матрица в роли матрицы ковариаций.

На втором шаге рассматривается участок траектории, соответствующий первым $2p$ квантам управления. А в методе оптимизации в роли начального решения используется вектор $\vec{m} = \tilde{\vec{u}}_1 \cup \vec{u}_2$, где $\tilde{\vec{u}}_1$ – решение, полученное на первом шаге. Матрица ковариаций $C_2 = \{c_{ij}\} \in \mathbb{R}^{2pM \times 2pM}$, где

$$c_{ij} = \begin{cases} 0,01,\ i = j, i = \overline{1, pM} \\ 1,\ i = j, i = \overline{pM+1, 2pM} \\ 0,\ i \ne j \end{cases}.$$

При таком выборе ковариационной матрицы $C$ на первых итерациях алгоритма Basin-CMA последние $pM$ компонент вектора математического ожидания варьируются в 10 раз сильнее, чем компоненты вектора, полученные на предыдущем шаге. В первую очередь осуществляется поиск управления для добавленного участка траектории с одновременной оптимизацией и адаптацией управления, найденного ранее.

Таким образом, на шаге $k$ решается задача поиска оптимального управления для участка, состоящего из первых $k$ частей траектории. Начальный вектор математического ожидания $\vec{m}_k = \tilde{\vec{u}}_{k-1} \cup \vec{u}_k$ и матрица ковариаций $C_k = \{c_{ij}\}$, где

$$c_{ij} = \begin{cases} 0,01,\ i = j, i = \overline{1, (k-1)pM} \\ 1,\ i = j, i = \overline{(k-1)pM+1, kpM} \\ 0,\ i \ne j \end{cases}$$

Результатом выполнения последнего шага $k = \left\lceil \frac{N}{p} \right\rceil$ является искомый вектор управления $\tilde{\tilde{u}}$.

**Экспериментальные исследования**

Исследование применимости и эффективности предложенных методов синтеза управления произведено на реальном четырехколесном мобильном роботе с двумя каналами управления скоростью вращения колес, реализующими управление движением робота, аналогичное управлению с классическим «дифференциальным» приводом. Множество допустимых действий каждого из исполнительных устройств $D_1 = D_2 = \{-10, -9, \ldots, 10\}$.

Для решения задачи локализации робот оснащен двумя одометрами, акселерометром, магнетометром и трехосным гироскопом. Комбинация магнетометра и гироскопа позволила определить ориентацию робота с точностью $\pm 2$ градуса. При движении без поперечного проскальзывания точность определения положения робота составляла около 1 % от пройденного пути и около 5 % при движении с продольным и поперечным проскальзыванием колес.

Также для исследований с помощью Microsoft Robotics Developer Studio была создана виртуальная модель робота с дифференциальным приводом. Данная среда моделирования позволяет создавать роботов различной конфигурации, задавать и изменять в процессе движения параметры робота и окружающей среды, например, такие, как масса робота, положение центра масс, а также коэффициенты сил трения продольного и поперечного скольжений. Кроме этого, в Robotics Studio возможно точное определение положения и ориентации робота в пространстве.

В качестве тестовых траекторий для обучения использовались маневр «полицейский разворот» и движение по криволинейной траектории (синусоиде). Движение по синусоиде оказалось очень удобным для оценки эффективности применения описанных методов на траекториях различной длины, в силу простоты описания траектории и ее масштабируемости. В роли целевой функции выбрано среднеквадратическое отклонение фазовых координат робота в процессе движения относительно целевой траектории, в заданные моменты времени.

И в реальной, и в виртуальной среде использование предложенной модификации алгоритма Basin-CMA позволило быстро находить вектор управления для движения по заданному маршруту и адаптироваться к изменениям параметров робота.

При изучении предложенного итеративного подхода рассматривалось разбиение исходного вектора управления на части, соответствующие $p = 5$ тактам управления и размерности $n = 10$. Использование меньшей размерности для подзадач лишь увеличивало их количество, а число итераций, необходимое для их решения, оставалось без изменения. Среднее количество учебных заездов на решение одной подзадачи (выполнение одного шага) составляло около 300÷350. Как видно из рис. 2, решение задач большей размерности требует существенно большего количества итераций.

На рисунке показано, что по количеству «вычислений» целевой функции итеративный подход дает незначительное преимущество по сравнению

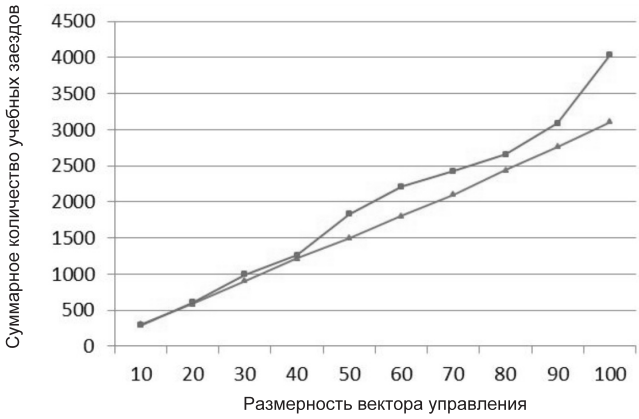



Рис. 2. Суммарное количество заездов во время обучения, в зависимости от длины траектории (размерности исходной задачи) (—◄—) итеративный подход; (—■—) Basin-CMA

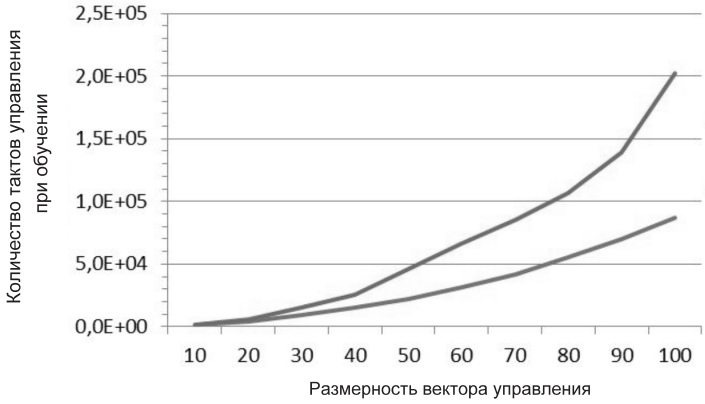



Рис. 3. Зависимость времени обучения от размерности исходной задачи
(———) итеративный подход; (———) Basin-CMA

с базовым алгоритмом. Однако в данном сравнении важно учесть, что в случае использования оригинального Basin-CMA для решения исходной задачи, на каждой итерации робот осуществляет движение по всей длине траектории, а в предложенном подходе – только по ее части. Для пути, пройденного в процессе обучения и измеренного в тактах управления, получены данные, представленные на рис. 3.

Таким образом, для задачи с исходной размерностью $n_0 = 100$ применение предложенного итеративного подхода с разбиением вектора управления на $k = 10$ частей равной размерности дало выигрыш в два раза по времени обучения и пройденному пути, по сравнению с обучением с использованием базового метода Basin-CMA.

Проведенные исследования показали, что метод Basin-CMA применим для автономного обучения мобильного робота выполнению различных маневров и синтеза траекторного управления, а также для оптимизации существующих программных управлений. Базовый и модифицированный методы работают в условиях невозможности построения точной математической модели, а системы управления, построенные на их основе, способны адаптироваться к нелинейным и изменчивым свойствам объекта и к изменениям в окружающей среде. Предложенный подход существенно ускоряет поиск оптимального управления для протяженных траекторий, требующих большого количества управляющих действий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурдаков С.Ф.** Системы управления движением колесных роботов [Текст] / С.Ф. Бурдаков, И.В. Мирошник, Р.Э. Стельмаков. –СПб.: Наука, 2001.

2. **Stotsky, A.** Sliding mode control of a car like mobile robot using single track dynamic model [Text] / A. Stotsky, X. Hu, M. Egerstedt // Proc. of the 14th Word Congress of the IFAC. –1999. –Vol. B. –P. 119–124.

3. **Мирошник, И.В.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами [Текст] / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. –СПб.: Наука, 2000.

4. **Johnson, E.** Adaptive trajectory control for autonomous helicopters [Text] / E. Johnson, S. Kannan // J. of Guidance, Control, and Dynamics. –2005. –Vol. 28. –P. 524–538.

5. **Жданов, А.А.** Нейронная адаптивная система управления [Текст] / А.А. Жданов, М.В. Крыжановский // V Всерос. науч.-техн. конф. Нейроинформатика-2003. –2003. –С. 163–168.

6. **Жданов, А.А.** Автономный искусственный интеллект [Текст] / А.А. Жданов. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.

7. **Чернодуб, А.Н.** Обзор методов нейроуправления [Текст] / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. –2011. –№ 2. –С. 79–94.

8. **Hansen, N.** Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation [Text] / N. Hansen, A. Ostermeier // Proc. of the 1996 IEEE Conf. on Evolutionary Computation. –1996. –P. 312–317.

9. **Auger, A.** Experimental Comparisons of Derivative Free Optimization Algorithms [Text] / A. Auger, N. Hansen, J. Perez Zerpa [et al.] // Proc. of the 8th International Symp. on Experimental Algorithms. –2009. –P. 3–15.

10. **Wampler, K.** Optimal Gait and Form for Animal Locomotion [Text] / K. Wampler, Z. Popović // ACM Transactions on Graphics –2009. –Vol. 28. –№ 3.

УДК 658.512

*Е.М. Бронштейн, Р.В. Гиндуллин*
*Уфа, Россия*

# ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦИИ

*E.M. Bronshtein, R.V. Gindullin*
*Ufa, Russia*

# ON ONE CLASS OF ROUTING PROBLEMS

Рассмотрена оптимизационная задача доставки однородного груза из некоторых пунктов производства в пункты потребления транспортным средством ограниченной вместимости с возможностью неоднократного посещения каждого пункта. Приведена формализация поставленной задачи, предложено несколько эвристических алгоритмов решения и результаты вычислительных экспериментов.

МАРШРУТИЗАЦИЯ. ОПТИМИЗАЦИЯ. ЭВРИСТИКИ.

Some problem of optimization of delivery of homogeneous cargo from some points of manufacture in points of consumption by a vehicle of the limited capacity with opportunity of multiple visitations are considered. Formalization of tasks is resulted, group algorithms of the decision and results of computing experiments are offered.

ROUTING. OPTIMIZATION. HEURISTICS.

Задачи маршрутизации – важный класс задач дискретной оптимизации. Начиная с работы Данцига и Рамцера [1], в которой исследовалась задача, названная VRP (Vehicle Routing Problem), анализировался широкий класс задач этого класса (см., в частности, обзоры [2–4, 6, 7]).

В данной статье рассматривается оптимизационная задача доставки однородного груза из некоторых пунктов производства в пункты потребления транспортным средством ограниченной вместимости с возможностью неоднократного посещения каждого пункта, приводятся и экспериментально исследуются несколько эвристических методов решения поставленной задачи. Транспортное средство (ТС) первоначально находится в депо и по окончании перевозок должно в депо вернуться. Доставку груза необходимо организовать по кратчайшему пути.

Будем считать, что все пункты пронумерованы числами 0, 1, ..., $n$, депо присвоен номер 0. Через $a(i)$ обозначим объем груза в пункте производства (в этом случае $a(i) > 0$) или потребность в пункте потребления (тогда $a(i) < 0$). Мы не исключаем, что депо совпадает с пунктом производства, в противном случае $a(0) = 0$. Естественно считать, что $\sum_{i=0}^{n} a(i) = 0$. Задана также матрица $C$ расстояний между пунктами: $C_{ij}$ ($i,j$ = 0, 1, ..., $n$) – расстояние от $i$-го пункта до $j$-го.

В [5] рассмотрен вариант задачи, в которой ТС могло посещать каждый пункт, кроме депо, только один раз.

### Постановка задачи

Поскольку ТС может посещать каждый пункт неоднократно (из каждого пункта производства вывозить груз можно в несколько заходов и также в несколько заходов можно завозить груз в пункт

потребления), то доставка возможна при любой вместимости ТС.

Формализация задачи имеет следующий вид.

Необходимо найти последовательность пар ($u(0)$, $v(0)$), ($u(1)$, $v(1)$), ..., ($u(N)$, $v(N)$) (число $N$ априори неизвестно), первый элемент которых – номер пункта, то есть $u(i) \in \{0, 1, ..., n\}$, второй – вес груза, вывозимого или доставляемого при соответствующем посещении пункта

Должны выполняться следующие ограничения:

$$u(0)= u(N)=0 \qquad (1)$$

(ТС должно начинать и заканчивать движение на базе);

$$0 \le \sum_{i=0}^{k} v(i) \le S \quad (k = 0, 1, ..., N) \qquad (2)$$

(ограничение на вместимость ТС);

$$\sum_{i=0}^{N} \{v(i) : u(i) = j\} = a(j) \quad (j = 0, 1, ..., n) \qquad (3)$$

(из каждого пункта груз полностью вывозится, потребность каждого потребителя удовлетворяется);

$$\text{если } u(i) = j, \text{ то } v(i)a(j) \ge 0 \qquad (4)$$

(из пункта производства груз только вывозится, в пункт потребления только доставляется – из условия (3) это не следует).

Целевая функция:

$$\sum_{i=0}^{N-1} C_{u(i),u(i+1)} \to \min. \qquad (5)$$

Для решения задачи (1)–(5) применен следующий эвристический подход.

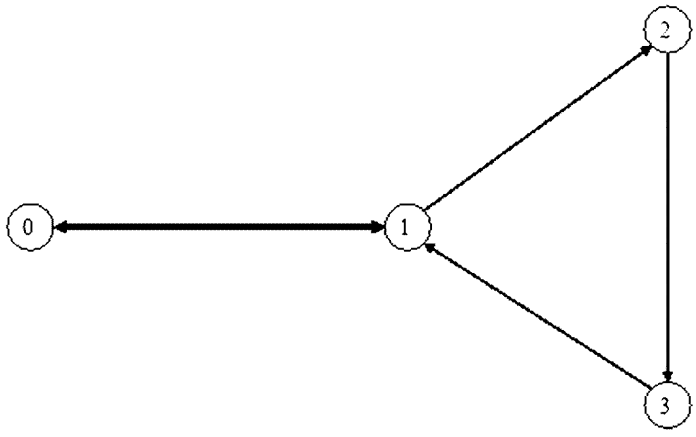
На каждом шаге ТС выбирает пункт, куда оно отправится. Для этого ТС перебирает все возможные допустимые варианты перемещения на $k$ последующих шагов. Из них выбирается вариант с наименьшей длиной перемещения, и ТС делает один шаг по выбранному пути. Далее ТС снова производит перебор вариантов перемещения на $k$ последующих шагов, выбирает из них маршрут с наименьшей длиной, делает один шаг и так происходит до тех пор, пока не будут пройдены все пункты. Перед запуском алгоритма выбирается значение параметра $k$.

Во время перебора последующих $k$ шагов следует следить за тем, чтобы не попадать в пункты, которые уже были полностью обслужены, а также, чтобы заполненное ТС не попадало в пункт производства или пустое ТС – в пункт потребления. При попадании в пункт производства ТС вывозит весь наличный груз (если позволяет вместимость), либо заполняется полностью. При попадании в пункт потребления ТС оставляет весь груз (если при этом не возникает избытка груза), либо полностью заполняет пункт потребления.

Следует заметить, что стратегии описанного типа (забери или оставь как можно больше) не обязательно приводят к оптимальному решению.

Пример 1. На рисунке отмечены пункты 0, 1, 2, 3 и соответствующая сеть дорог (некоторые из них с односторонним движением).

Полагаем, что длины всех отрезков равны единице. Расстояния определяются как длины кратчайших путей. Например: $C_{1,2} = 1$, $C_{2,1} = 2$, $C_{0,2} = 2$, $C_{2,0} = 3$.




Пример задачи, в которой неэффективен жадный алгоритм

**Результаты численных экспериментов**

| $n$ | Среднее время решения, с | | | | Среднее отношение длины маршрута к длине маршрута, найденного алгоритмом А | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ |
| Группа задач I | | | | | | | | |
| 4 | 0,00047 | 0,0012 | 0,0016 | 0,0030 | 1 | 1,031 | 0,986 | 0,959 |
| 5 | 0,0012 | 0,0019 | 0,0042 | 0,0095 | 1 | 1,058 | 1,010 | 0,974 |
| 6 | 0,0011 | 0,0028 | 0,0089 | 0,029 | 1 | 1,106 | 1,037 | 1,017 |
| 7 | 0,0011 | 0,0045 | 0,019 | 0,074 | 1 | 1,086 | 1,067 | 1,038 |
| 8 | 0,0025 | 0,0068 | 0,037 | 0,18 | 1 | 1,086 | 1,056 | 1,034 |
| 9 | 0,0026 | 0,011 | 0,06 | 0,33 | 1 | 1,083 | 1,073 | 1,032 |
| 10 | 0,0028 | 0,014 | 0,10 | 0,62 | 1 | 1,101 | 1,098 | 1,074 |
| 11 | 0,0031 | 0,020 | 0,15 | 1,1 | 1 | 1,106 | 1,083 | 1,046 |
| 12 | 0,0031 | 0,026 | 0,22 | 1,8 | 1 | 1,108 | 1,090 | 1,085 |
| 13 | 0,0042 | 0,037 | 0,33 | 3,0 | 1 | 1,092 | 1,060 | 1,036 |
| 14 | 0,0042 | 0,046 | 0,45 | 4,6 | 1 | 1,115 | 1,076 | 1,065 |
| 15 | 0,0053 | 0,058 | 0,66 | 7,1 | 1 | 1,099 | 1,119 | 1,101 |
| 16 | 0,0053 | 0,072 | 0,84 | 10,0 | 1 | 1,137 | 1,129 | 1,128 |
| 17 | 0,0066 | 0,092 | 1,1 | 14,0 | 1 | 1,101 | 1,110 | 1,081 |
| 18 | 0,0070 | 0,11 | 1,5 | 19,7 | 1 | 1,121 | 1,095 | 1,113 |
| 19 | 0,0073 | 0,13 | 1,8 | 25,5 | 1 | 1,128 | 1,097 | 1,070 |
| 20 | 0,0082 | 0,16 | 2,4 | 35,1 | 1 | 1,112 | 1,072 | 1,081 |
| 21 | 0,0094 | 0,19 | 3,0 | 46,8 | 1 | 1,099 | 1,090 | 1,099 |
| 22 | 0,0079 | 0,23 | 3,8 | 63,4 | 1 | 1,132 | 1,104 | 1,080 |
| 23 | 0,0089 | 0,26 | 4,6 | 79,8 | 1 | 1,124 | 1,092 | 1,100 |
| 24 | 0,011 | 0,31 | 5,8 | 102,1 | 1 | 1,106 | 1,101 | 1,103 |
| 25 | 0,011 | 0,36 | 7,0 | 136,5 | 1 | 1,141 | 1,109 | 1,129 |
| Группа задач II | | | | | | | | |
| 4 | 0,00077 | 0,0042 | 0,010 | 0,027 | 1 | 1,008 | 1,007 | 1,007 |
| 5 | 0,0009 | 0,0088 | 0,023 | 0,073 | 1 | 1,011 | 1,009 | 1,009 |
| 6 | 0,0014 | 0,014 | 0,047 | 0,17 | 1 | 1,007 | 1,007 | 1,006 |
| 7 | 0,0010 | 0,026 | 0,095 | 0,39 | 1 | 1,012 | 1,015 | 1,012 |
| 8 | 0,0022 | 0,040 | 0,17 | 0,81 | 1 | 1,009 | 1,009 | 1,012 |
| 9 | 0,0027 | 0,059 | 0,29 | 1,6 | 1 | 1,007 | 1,008 | 1,010 |
| 10 | 0,0027 | 0,081 | 0,41 | 2,4 | 1 | 1,009 | 1,012 | 1,015 |
| 11 | 0,0036 | 0,11 | 0,64 | 4,2 | 1 | 1,007 | 1,012 | 1,013 |
| 12 | 0,0042 | 0,15 | 0,94 | 6,7 | 1 | 1,010 | 1,013 | 1,015 |
| 13 | 0,0046 | 0,20 | 1,4 | 10,7 | 1 | 1,011 | 1,012 | 1,019 |
| 14 | 0,0044 | 0,26 | 1,9 | 16,3 | 1 | 1,013 | 1,020 | 1,023 |
| 15 | 0,0056 | 0,34 | 2,7 | 24,0 | 1 | 1,012 | 1,014 | 1,016 |
| 16 | 0,0051 | 0,41 | 3,4 | 31,8 | 1 | 1,016 | 1,020 | 1,026 |
| 17 | 0,0083 | 0,53 | 4,8 | 49,0 | 1 | 1,011 | 1,013 | 1,018 |
| 18 | 0,0078 | 0,81 | 7,8 | 82,3 | 1 | 1,011 | 1,014 | 1,020 |
| 19 | 0,0070 | 0,74 | 7,4 | 83,9 | 1 | 1,009 | 1,016 | 1,022 |
| 20 | 0,0083 | 0,87 | 9,5 | 114,3 | 1 | 1,011 | 1,018 | 1,024 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 0,011 | 1,4 | 15,4 | 190,9 | 1 | 1,013 | 1,018 | 1,024 |
| 22 | 0,011 | 1,5 | 17,6 | 226,0 | 1 | 1,012 | 1,018 | 1,022 |
| 23 | 0,010 | 1,6 | 19,6 | 267,2 | 1 | 1,010 | 1,016 | 1,020 |
| 24 | 0,012 | 1,7 | 22,1 | 314,7 | 1 | 1,010 | 1,015 | 1,025 |
| 25 | 0,013 | 2,1 | 28,6 | 426,0 | 1 | 1,012 | 1,014 | 1,021 |
| Группа задач III | | | | | | | | |
| 4 | 0,00077 | 0,0014 | 0,0036 | 0,0065 | 1 | 1,019 | 1,003 | 0,969 |
| 5 | 0,00093 | 0,0027 | 0,0076 | 0,023 | 1 | 1,033 | 1,013 | 0,991 |
| 6 | 0,00078 | 0,0047 | 0,018 | 0,059 | 1 | 1,055 | 1,018 | 0,996 |
| 7 | 0,0020 | 0,0059 | 0,031 | 0,12 | 1 | 1,025 | 1,012 | 1,014 |
| 8 | 0,0011 | 0,0129 | 0,056 | 0,27 | 1 | 1,051 | 1,028 | 1,023 |
| 9 | 0,0025 | 0,02 | 0,10 | 0,65 | 1 | 1,049 | 1,065 | 1,023 |
| 10 | 0,0020 | 0,03 | 0,16 | 0,97 | 1 | 1,034 | 1,027 | 1,025 |
| 11 | 0,0023 | 0,04 | 0,24 | 1,6 | 1 | 1,042 | 1,060 | 1,032 |
| 12 | 0,0035 | 0,05 | 0,34 | 2,5 | 1 | 1,038 | 1,024 | 1,014 |
| 13 | 0,0039 | 0,07 | 0,58 | 4,8 | 1 | 1,043 | 1,046 | 1,032 |
| 14 | 0,0049 | 0,08 | 0,74 | 6,4 | 1 | 1,024 | 1,041 | 1,045 |
| 15 | 0,0060 | 0,10 | 0,96 | 9,0 | 1 | 1,035 | 1,044 | 1,037 |
| 16 | 0,0053 | 0,14 | 1,4 | 14,0 | 1 | 1,045 | 1,046 | 1,031 |
| 17 | 0,0059 | 0,16 | 1,7 | 18,4 | 1 | 1,051 | 1,041 | 1,036 |
| 18 | 0,0067 | 0,21 | 2,4 | 28,2 | 1 | 1,044 | 1,050 | 1,033 |
| 19 | 0,0076 | 0,25 | 3,0 | 37,6 | 1 | 1,066 | 1,064 | 1,074 |
| 20 | 0,0086 | 0,31 | 3,9 | 50,7 | 1 | 1,030 | 1,039 | 1,037 |
| 21 | 0,0085 | 0,38 | 5,0 | 69,1 | 1 | 1,020 | 1,047 | 1,033 |
| 22 | 0,010 | 0,41 | 5,7 | 82,5 | 1 | 1,056 | 1,070 | 1,070 |
| 23 | 0,010 | 0,51 | 7,5 | 112,5 | 1 | 1,045 | 1,051 | 1,047 |
| 24 | 0,010 | 0,61 | 9,4 | 148,2 | 1 | 1,049 | 1,061 | 1,056 |
| 25 | 0,013 | 0,78 | 12,5 | 207,5 | 1 | 1,034 | 1,040 | 1,039 |

Наличие и потребности в грузе в пунктах равны соответственно 2, –2, –1, 1. Оптимальный план перевозок, очевидно, имеет вид ((0,2), (1,–1), (2,–1), (3,1), (1,–1), (0,0)). Длина маршрута при этом равна 5.

Описанная стратегия приводит к плану перевозок ((0,2), (1,–2), (3,1), (2,–1), (0,0)). Длина маршрута равна 8.

### Численные эксперименты

Для заданного числа пунктов $n$

- генерируются с помощью датчика случайных чисел целочисленные величины $a(1), ..., a(n)$ из заданного промежутка (см. ниже), принимаем $a(n) = -\sum_{i=1}^{n-1} a(i)$;
- аналогично генерируются $2n$ вещественных чисел – координаты пунктов $(x(i), y(i))$ $(i = 1, ..., n)$, за базу принимается точка (0,0), расстояния $C_{i,j}$ принимаются равными евклидовым расстояниям между точками.

Вместимость ТС, $S$ считается целочисленной и задается случайным образом в указанном промежутке (см. ниже).

Производилась генерация трех групп задач:

I. $-2 \le a(i) \le 2$, $S \le 5$;

II. $-5 \le a(i) \le 5$, $S \le 50$;

III. $-50 \le a(i) \le 50$, $S \le 50$.

Для каждого $n \in [4;25]$ в каждой группе генерировались сто примеров.

К каждой полученной задаче применялся указанный алгоритм при $k$ равном 1, 2, 3 или 4. Длины полученных маршрутов сравниваются с результатом алгоритма при $k$, равном единице.

В таблице приведены результаты численных экспериментов.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

во всех группах задач при $n >= 6$ алгоритм при $k = 1$ находит результат по длине маршрута и затраченному времени (число операций), чем при других значениях $k$;

средняя длина маршрута, полученная при $k = 2$, близка к аналогичному результату при $k = 3$ и $k = 4$, но временные затраты существенно ниже;

разница в расстояниях найденных маршрутов в среднем находится в пределах 10 %, а у второй группы задач – в пределах 1 %. С увеличением количества пунктов эта величина сохраняется;

вторая группа задач (значительные веса потребителей при небольшой вместимости ТС) является самой трудоемкой с точки зрения затрат времени.

Рассмотрена задача маршрутизации. Приведена ее формализация. Предложены подходы к решению и проведены численные эксперименты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dantzig, G.B.** The Truck Dispatching Problem [Text] / G.B. Dantzig, J.H. Ramser // Management Science. –1959. –Vol. 6. –№ 1. –P. 80–91.

2. **Parragh, S.** A survey on pickup and delivery problems. Part I: Transportations between customers and depot [Text] / S. Parragh, K. Doerner, R. Hartl // J. fur Betriebswirtschaft. –2008. –Vol. 58. –P. 21–51.

3. **Parragh, S.** A survey on pickup and delivery problems. Part I: Transportations between customers and depot [Text] / S. Parragh, K. Doerner, R. Hartl // J. fur Betriebswirtschaft. –2008. –Vol. 58. –P. 82–117.

4. **Berbeglia, G.** Static pickup and delivery problems: A classi_cation scheme and survey [Text] / G. Berbeglia, J.F. Cordeau, I. Gribkovskaia [et al.] // TOP. –2007. –Vol. 15. –№ 1. –P. 1–31.

5. **Бронштейн, Е.М.** Об одном классе задач маршрутизации [Текст] / Е.М. Бронштейн, Р.В. Гиндуллин // Математическое моделирование. –2011. –Т. 23. –№ 6. –С. 123–122.

6. **Бронштейн, Е.М.** Детерминированные оптимизационные задачи транспортной логистики [Текст] / Е.М. Бронштейн, Т.А. Заико // Автоматика и телемеханика. –2010. –№ 10. –С. 133–147.

7. **Кристофидес, Н.** Теория графов. Алгоритмический подход [Текст] / Н. Кристофидес. –М.: Мир, 1978. –432 с.

УДК 004.942: 51-7

*А.Г. Масловская*
*Благовещенск, Россия*

# ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В ПОЛЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

*A.G. Maslovskaya*
*Blagoveshensk, Russia*

# THE USE OF VARIATIONAL PRINCIPLES FOR COMPUTER SIMULATION OF FERROELECTRIC DOMAIN BOUNDARY DYNAMICS IN THE TEMPERATURE GRADIENT FIELD

Представлены результаты компьютерного моделирования конфигурации доменной границы в неоднородном тепловом поле на основе вариационного подхода. Решение модельной задачи проведено с использованием численного метода локальных вариаций. Реализация имитационной модели позволяет наблюдать динамику доменных границ сегнетоэлектриков, а также оценить компоненту поляризационного тока, обусловленного движением доменной границы в поле градиента температуры.

ВАРИАЦИОННАЯ ЗАДАЧА. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК. ДОМЕННАЯ ГРАНИЦА. ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ. ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The paper focuses on computer simulation of domain boundary pattern in nonuniform thermal field, which is based on variational approach. The numerical method of local variations was used to solve the model problem. Simulations allow supervising the ferroelectric domain boundaries dynamics as well as estimating the component of polarization current due to domain boundary movement in the temperature gradient field.

VARIATIONAL PROBLEM. FERROELECTRIC. DOMAIN BOUNDARY. THERMAL FIELD. NUMERICAL ALGORITHM. SIMULATION.

Применение методов компьютерного анализа и разработка систем имитационного моделирования – важные составляющие в широком спектре научных исследований, в т. ч. и в физике конденсированной среды, при этом компьютерное моделирование физических систем на современном этапе предъявляет качественно новые требования к постановке и проведению вычислительных экспериментов.

Одним из распространенных аналитических методов исследования и технологической обработки полярных материалов различного функционального назначения является метод растровой электронной микроскопии. Многие эффекты взаимодействия электронного облучения с полярными диэлектриками не всегда удается исследовать экспериментально, поэтому на практике часто прибегают к использованию средств и методов математического и компьютерного моделирования, основанных на физических законах взаимодействия излучения с веществом, механизмах формирования изображения в зондовых приборах и верифицированных принципах построения и реализации таких моделей.

Взаимодействие электронного зонда с доменной структурой сегнетоэлектрических материалов приводит к появлению в цепи замкнутого образца сигнала, который может быть использован для формирования изображения потенциального контраста. Причинами появления сигнала, в частности, может быть электрическое или тепловое воздействие электронного зонда на исследуемый образец. В работе [1] сообщалось об использовании тока, обусловленного инжекцией электронов

под поверхность образца, в качестве видеосигнала, а также приведено теоретическое обоснование и модельное представление формирования тока электронно-стимулированной поляризации. В [2] проведено математическое моделирование формы видеосигнала, обусловленного наличием явления пироэффекта в предположении неподвижных доменных границ. Однако зависимость поверхностной энергии доменной границы сегнетоэлектрического кристалла от температуры приводит к ее смещению в неоднородном тепловом поле, что создает дополнительный вклад в видеосигнал.

Цель данной статьи – описание разработки и программной реализации математической модели движения доменной границы сегнетоэлектрического кристалла в неоднородном тепловом поле на основе вариационного подхода, а также модельное представление поляризационного тока, обусловленного динамикой доменной границы.

## Описание концептуальной постановки задачи моделирования

Интерес к изучению доменных и межфазных границ и их динамики обусловлен определяющей ролью этих явлений в процессах поляризации и переполяризации сегнетоэлектрических материалов. Феноменологическое описание процессов движения доменных границ под действием термодинамических сил использовалось при описании и моделировании процессов переполяризации в ряде работ [3–7]. Так, в работе Алешина и Лучанинова [3] представлен расчет смещения стенок с помощью компьютерного моделирования для модельного полидоменного кристалла, обладающего слоистой структурой типа «паркет». В работе Нестерова [4] представлено детальное исследование механизмов движения доменных и межфазных границ в твердых растворах. Парлинский [5] построил и исследовал компьютерную модель поведения доменной стенки вблизи фазового перехода, в основе которой лежит модель одной ячейки, обладающей потенциальной энергией. Большинство исследований в этой области основывались на рассмотрении кинетики доменных и межфазных границ с макроскопической точки зрения. В макроскопических моделях кроме термодинамических сил вводят феноменологические силы вязкости различной природы (сухого, вязкого трения), иногда – инерции.

В отсутствие электрического поля энергетическое состояние различных доменов оказывается эквивалентным, однако поверхностные силы могут также приводить к движению доменных границ. Так, в работе [6] приведены исследования спонтанного движения доменных границ под действием лапласовских сил. Однако не только кривизна, но и зависимость поверхностной энергии от температуры в неоднородном тепловом поле будет приводить к возникновению термодинамических сил. В области с более высокой температурой поверхностная энергия стенки уменьшается, что приводит к появлению термодинамической силы, действующей на стенку и направленной вдоль градиента температуры. При температуре, равной температуре фазового перехода, различие между доменными областями плавно исчезает и поверхностная энергия доменной стенки обращается в нуль.

Следуя термодинамической теории сегнетоэлектриков Ландау–Гинзбурга–Девоншира допустим, что тепловое, упругое и диэлектрическое поведение однородного диэлектрика полностью описывается шестью величинами: полями температуры $T$, энтропии $S$, напряжения $\mathbf{X}$, деформации $\mathbf{x}$, электрического поля $\mathbf{E}$ и электрической индукции $\mathbf{D}$. Термодинамической функцией, достаточно полно описывающей свойства сегнетоэлектриков, может служит свободная энергия – упругая энергия Гиббса $G_1(T, X_i, D_i)$ [8]. В частном случае, когда приложенные механические напряжения отсутствуют, то есть $X = 0$, неполярная фаза центросимметрична и $D_i = D$ – индукция направлена вдоль одной из кристаллографических осей, функция $G_1$ имеет вид простого полинома:

$$G_1 = \frac{\tilde{\alpha}}{2}D^2 + \frac{\tilde{\gamma}}{4}D^4 + \frac{\tilde{\delta}}{6}D^6 + \dots . \qquad (1)$$

Коэффициенты $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{\delta}$, в общем случае, зависят от температуры, но простые примеры переходов первого и второго рода можно описать, считая, что $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{\delta}$ не зависят от температуры (при таком предположении порядок перехода зависит от знака $\tilde{\gamma}$). В феноменологической теории принято считать, что вблизи температуры Кюри $T_C$ параметр $\tilde{\alpha}$ линейно зависит от температуры (выполняется закон Кюри–Вейсса):

$$\tilde{\alpha} = \beta(T - T_C), \qquad (2)$$

где $\beta$ – положительная константа, связанная с константой Кюри–Вейсса $C^P$ соотношением

$C^P = \dfrac{1}{\varepsilon_0 \cdot \beta}$ ($\varepsilon_0$ – электрическая постоянная).

В силу того, что $D \sim P$ при $E = 0$, из условия $\dfrac{\partial G_1}{\partial D} = 0$ нетрудно вычислить спонтанную поляризацию $P_S$ ниже температуры Кюри для сегнетоэлектрических кристаллов с фазовыми переходами второго рода [8]:

$$P_S^2 = \frac{\beta}{\tilde{\gamma}}(T_C - T). \qquad (3)$$

Зависимость поверхностной энергии доменной стенки от температуры в неоднородном тепловом поле будет приводить к возникновению термодинамических сил, что, в свою очередь, вызовет ее смещение. Выражение для поверхностной энергии доменной границы было впервые предложено Жирновым [8]:

$$\sigma = \left(-\frac{4\sqrt{2}}{3}\right) \cdot \tilde{\delta} \cdot \tilde{\alpha} \cdot P_S^2, \qquad (4)$$

где $\tilde{\delta} = \sqrt{-\dfrac{f}{\tilde{\alpha} \cdot \varepsilon_0}}$ – толщина доменной стенки; $f \sim d^2$ – коэффициент в выражении вклада корреляционной энергии в свободную энергию кристалла; $d$ – постоянная решетки.

Таким образом, для кристаллов с фазовыми переходами второго рода зависимость удельной поверхностной энергии $\sigma$ от температуры $T$ с учетом (2) и (3) примет вид:

$$\sigma = \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{d}{\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\beta^{3/2}}{\tilde{\gamma}} \cdot (T_C - T)^{3/2}. \qquad (5)$$

В области с более высокой температурой поверхностная энергия стенки уменьшается, что приводит к появлению термодинамической силы, направленной вдоль градиента температуры. Рассмотрим простейшее тепловое поле с линейным распределением температуры:

$$T(z) = T_0 + \alpha \cdot z, \qquad (6)$$

где $T_0$ – начальная температура для исходного положения границы; $\alpha = \dfrac{dT}{dz}$ – градиент температуры.

Для нормировки параметров можно задать некоторый уровень отклонения границы от равновесного положения $z_c$, соответствующий температуре Кюри $T_C$. Тогда

$$T(z) = \alpha(z - z_c) + T_C. \qquad (7)$$

Подстановка последнего в (5) дает

$$\sigma(z) = \sigma_0(\alpha(z_c - z))^{3/2}, \qquad (8)$$

где $\sigma_0 = \dfrac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \dfrac{d}{\sqrt{\varepsilon_0}} \cdot \dfrac{\beta^{3/2}}{\gamma}$.

## Математическая постановка задачи моделирования конфигурации доменной границы на основе вариационного подхода

Один из известных подходов к построению физико-математических моделей, сопоставимых с возможностями, предоставляемыми универсальными фундаментальными законами природы, заключается в использовании вариационных принципов. Использование принципа вариации в моделировании, как правило, предполагает выбор одного из возможных вариантов состояния системы, удовлетворяющего определенному критерию оптимальности.

Задачу о моделировании равновесной конфигурации в поле линейного градиента температуры можно сформулировать как вариационную задачу о минимизации функционала:

$$\Phi(z(x,y)) = \iint_S \sigma(z(x,y))dS = \\ = \iint_D \sigma(x,y,z) \cdot \sqrt{1 + z_x'^2 + z_y'^2}\, dxdy \to \min \qquad (9)$$

или в двумерном случае, с учетом (8):

$$\Phi(z(x)) = \int_{x_0}^{X} \alpha^{3/2}\sigma_0(z_{\tilde{n}} - z)^{3/2}\sqrt{1 + z_x'^2}\, dx \to \min, \qquad (10)$$

с граничными условиями, соответствующими случаю закрепления доменной стенки:

$$z(x_0) = z(X) = 0. \qquad (11)$$

На рис. 1 представлена схема изменения конфигурации доменной границы в тепловом поле.

Для общей постановки прикладной задачи (10), (11) можно ввести обозначения независимых

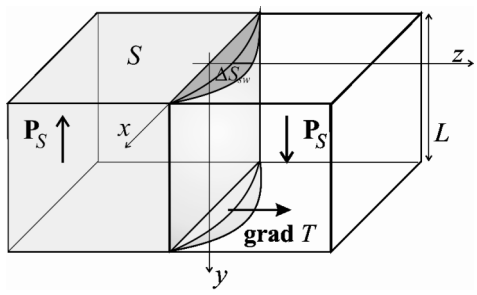



Рис. 1. Модельное представление конфигурации доменной границы

параметров в нормированных единицах: $\sigma_0 = 1$, $T_0 = -1$, $T_C = 0$, $z_c = 50$. В этом случае, градиент температуры примет значение $\alpha = 0,02$.

Для того чтобы убедиться, что экстремаль $z^*(x)$ доставляет минимум функционалу $\Phi(z(x)) = \int_{x_0}^{X} \alpha^{3/2}\sigma_0 (z_{\tilde{n}} - z)^{3/2} \sqrt{1 + z_x'^2}\, dx$, рассмотрим вторую производную подынтегральной функции $F(x, z, z')$ по $z'$:

$$F_{z'z'} = \sigma_0 \cdot \alpha^{3/2} \cdot \frac{(z_c - z)^{3/2}}{(1 + (z_x')^2)^{3/2}}. \qquad (12)$$

Знаменатель выражения (12) положителен при любых значениях $z'$, числитель также положителен при любых значениях $z$, поскольку формализация математической модели предполагает выполнение условия $z < z_c$. Из этого следует, что выполняется усиленное условие Лежандра $F_{z'z'} > 0$ и функционал (10), согласно теореме о достаточном условии слабого минимума (максимума), на некоторой экстремали $z^*(x)$ достигает своего минимума.

В общем случае вариационная задача в постановке (10), (11) не разрешается известными аналитическими методами и требует привлечения численных процедур.

### Применение метода локальных вариаций для численного решения прикладной задачи

Построим численное решение вариационной задачи (10) с граничными условиями (11), используя метод локальных вариаций [9]. Разобьем отрезок $[x_0, X]$ на $N$ равных частей с шагом $\Delta x = \frac{X - x_0}{N}$: $x_i = x_0 + i\Delta x$, $i = \overline{0, N}$. Согласно данному численному алгоритму введем обозначение для подынтегральной функции $F(x, z, z')$: (13)

$$I_i[z_i, z_{i+1}] = F(x_i + \Delta x/2, (z_i + z_{i+1})/2, (z_{i+1} - z_i)/\Delta x) \cdot \Delta x.$$

Функции $z(x)$ будем аппроксимировать ломаными, соединяющими точки $(x_i, z_i)$ в плоскости $Oxz$, а функционал (10), с учетом (13), приближенно заменим суммой $J \approx I = \sum_{i=0}^{N-1} I_i[z_i, z_{i+1}]$.

Решение задачи (10), (11) будем строить последовательными приближениями $z_i^{(n)}$, $n$ = 0, 1, 2, ..., выбирая в качестве начального приближения значения $z_i^0$, удовлетворяющие ограничениям (11). В качестве возможных значений для $z_i^{k+1}$ рассмотрим три величины: $z_i^k$, $z_i^k + h$, $z_i^k + h$ при

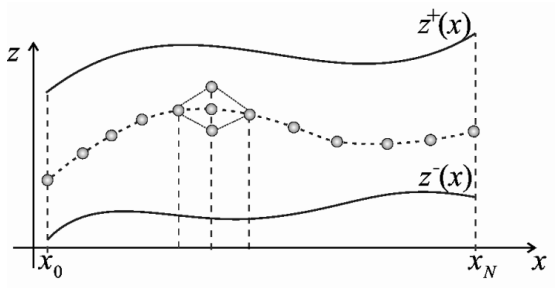



Рис. 2. Схема метода локальных вариаций [9]

априорно заданном шаге варьирования $h$. Далее проводим подсчет сумм:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= I_{i-1}[z_{i-1}^{k+1}, z_i^k] + I_i[z_i^k, z_{i+1}^k], \\ \Phi_i^+ &= I_{i-1}[z_{i-1}^{k+1}, z_i^k + h] + I_i[z_i^k + h, z_{i+1}^k], \\ \Phi_i^- &= I_{i-1}[z_{i-1}^{k+1}, z_i^k - h] + I_i[z_i^k - h, z_{i+1}^k]. \end{aligned} \qquad (14)$$

Искомую величину $z_i^{k+1}$ полагаем равной тому из трех чисел $z_i^k$ или $z_i^k + h$, или $z_i^k + h$, которое удовлетворяет ограничениям (11) и которому отвечает наименьшая из сумм (14):

$$z_i^{k+1} = \begin{cases} z_i^k & \text{при } \Phi_i \le \Phi_i^+,\ \Phi_i \le \Phi_i^- \\ z_i^k + h & \text{при } \Phi_i^+ < \Phi_i,\ \Phi_i^+ \le \Phi_i^- \\ z_i^k - h & \text{при } \Phi_i^- < \Phi_i,\ \Phi_i^- < \Phi_i^+ \end{cases}. \qquad (15)$$

Геометрическая схема метода локальных вариаций представлена на рис. 2.

Для оптимизации вычислений выбор шага дискретизации $\Delta x$ и шага варьирования $h$ проводился в соответствии со схемой двойного пересчета (т. е. для каждой итерации осуществлялась итерационная обработка с подбором оптимальных значений $\Delta x$ и $h$). Данный метод позволяет находить локальный минимум функционала при выполнении условий: $\Delta x \to 0$, $h/(\Delta x)^p$ при $p \ge 2$.

Следует отметить, что численное решение задачи (10), (11) может быть найдено и с использованием других известных методов решения задач в вариационной постановке, в частности, с помощью прямого численного решения краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения, полученного с помощью уравнения Эйлера:

$$z'' = -\frac{3(1 + z_x'^2)}{2(z_c - z)}.$$

Однако использование метода локальных вариаций оправдано, поскольку его алгоритм позволяется описать не только статическое предель-

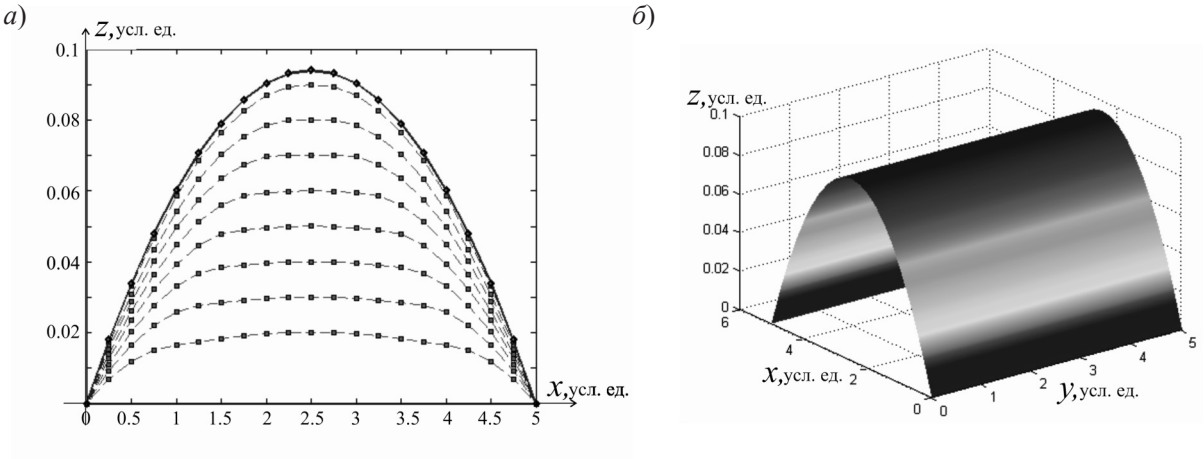



Рис. 3. Профиль доменной границы (*а*) и трехмерная визуализация двумерной модели (*б*)
(результат моделирования при нормированных значениях параметров)

ное положение доменной границы, но и динамику достижения этого положения. Такой подход, в случае решения данной физической задачи, находит идейное согласование с примененным ранее методом статистических испытаний [10], основу которого составляют два принципа: случайные колебания (флуктуации) элементов-звеньев границы и различие вероятностей каждого состояния в зависимости от его энергии.

Программная реализация модели проведена в ППП Matlab. На рис. 3 представлен результат численного моделирования динамики доменной границы при достижении равновесного положения.

Оценивая результат в нормированных величинах, можно заключить, что в поле постоянного градиента температуры максимальная величина отклонения доменной стенки от начального положения, соответствующего некоторому значению температуры $T_0$, составляет $\Delta z = 0{,}1$ усл. ед. при $\alpha = 0{,}02$ усл. ед. и при линейном размере домена $\Delta X = 5$ усл. ед. ($\Delta z$ ~2 %). При увеличении значения градиента будет увеличиваться и максимальное отклонение от равновесного положения. Численное значение величины $\Delta z$ будет определено параметрами моделирования $T_0$, $T_C$, $z_c$, $\alpha$, $X$ и не будет в итоге зависеть от величин, образующих комплекс $\sigma_0$.

### Алгоритм программной реализации модельной задачи расчета компоненты тока поляризации

Если вблизи доменной границы будет находиться тепловой источник, создающий неоднородное тепловое поле, зависимость поверхностной энергии границы от температуры будет приводить к появлению термодинамической силы, искривляющей профиль границы и создающей дополнительный вклад в поляризационный ток. Ток переключения поляризации сегнетоэлектрического кристалла может быть рассчитан из известного соотношения [8]:

$$I(t) = 2P_S S \frac{dQ}{dt}, \qquad (16)$$

где $S$ – площадь грани кристалла, м$^2$; $P_S$ – значение вектора спонтанной поляризации, Кл/м$^2$; $\frac{dQ}{dt}$ – изменение отношения переключенного объема $\Delta V_{sw}$ к полному объему кристаллического образца $V$, 1/с.

Графическая интерпретация изменения объема переполяризованной области за счет движения границы для кристалла со 180°-доменными стенками показана на рис. 1. В представленной модели, с учетом ее геометрии, соотношение (16) преобразуется к следующему виду:

$$I(t) = 2 \cdot \frac{P_S S}{V} \cdot \frac{\Delta V_{sw}}{\Delta t} = 2P_S \frac{\Delta S_{sw}}{\Delta t}, \qquad (17)$$

где $\Delta S_{sw}$ – изменение площади грани кристалла, соответствующее изменению объема домена за счет смещения стенки.

Значение вектора спонтанной поляризации $P(T)$ кристалла в точке с температурой $T$ может быть вычислено согласно соотношению (3). Тогда в нормированных единицах получим:

$$P_S(T) = \frac{P_S^0}{\sqrt{(T_C - T_0)}} \sqrt{(T_C - T)}, \qquad (18)$$

где $P_S^0$ – значение спонтанной поляризации сегнетоэлектрика при температуре, равной значению $T_0$.

Для определения тока переключения необходимо численно оценить значение изменения площади переполяризованной области с течением времени. В нашей модели такт времени будет соответствовать номеру итерации, на каждой из которых проводился расчет значения тока (положение доменной границы фиксировалось через каждые 100 шагов). Для вычисления изменения площади $\Delta S_{sw}$ воспользуемся формулой численного интегрирования – методом трапеций. Тогда, с учетом численного вычисления изменения площади и усредненного значения температуры в каждом узле, получим следующую расчетную формулу применительно к нашей модели:

$$I(t_j) = \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{P_S^0}{\sqrt{T_c - T_0}} dx \times$$
$$\times \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(z_0^k - z_0^{k+1})\sqrt{T_c - T_0 - \frac{\alpha}{2}(z_0^k + z_0^{k+1})} + \\ + \frac{1}{2}(z_N^k - z_N^{k+1})\sqrt{T_c - T_0 - \frac{\alpha}{2}(z_N^k + z_N^{k+1})} \\ + \sum_{i=0}^{N-1}\left( (z_i^k - z_i^{k+1})\sqrt{T_c - T_0 - \frac{\alpha}{2}(z_i^k + z_i^{k+1})} \right) \end{array} \right], \quad (19)$$

где $\Delta t$ – шаг по времени, определяемый номером итерации $j$.

Геометрическая визуализация формы компоненты поляризационного тока, обусловленного движением доменной границы под действием теплового поля, представлена на рис. 4.

Анализируя график, можно заключить, что переходной сигнал имеет резкий начальный выброс, обусловленный, по-видимому, более быстрым ростом скорости движения границы в начальные моменты времени. Дальнейшее поведение характеризуется спаданием, что, вероятно, соответствует замедлению движения границы.

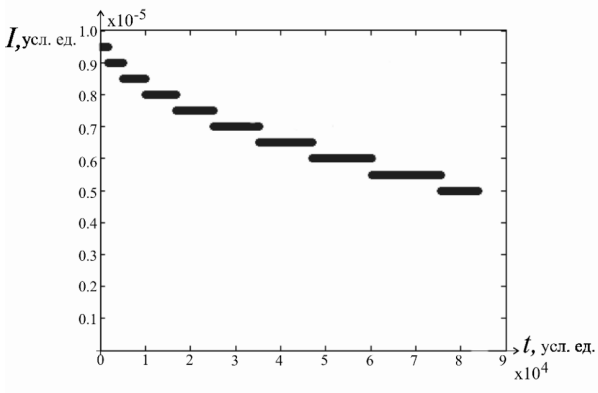



Рис. 4. Компонента поляризационного тока
значения параметров моделирования: $P_S^0 = 1$, $T_0 = -1$, $T_C = 0$

Таким образом, использование основных положений физики макроскопических систем и вариационного принципа моделирования позволили сформулировать физико-математическую двумерную модель динамики доменной границы сегнетоэлектрического кристалла в неоднородном тепловом поле. Применение численного алгоритма метода локальных вариаций, дающего пошаговое приближение к экстремали функционала, является эффективным и предоставляет возможность компьютерной имитации движения доменной границы. Такой подход позволяет получить не только равновесную форму доменной границы в тепловом поле, но и исследовать ее динамику в тепловых полях произвольной конфигурации. Эволюционная реализация модели предусматривает возможность оценки дополнительной компоненты пироэлектрического отклика, который обусловлен движением доменной границы сегнетоэлектрического кристалла в неоднородном тепловом поле. Кроме того, с учетом применимости метода локальных вариаций в многомерном случае, предложенную модель можно в дальнейшем модифицировать к случаю трех пространственных переменных с соответствующим заданием теплового распределения в модельном образце.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sogr, A.A.** Advanced modes of imaging of ferroelectric domains in the SEM [Text] / A.A. Sogr, A.G. Maslovskaya, I.B. Kopylova // Ferroelectrics. –2006. –Vol. 341. –P. 29–37.

2. **Maslovskaya, A.G.** Simulation of ferroelectric domain structure imaging in pyroelectric mode by scanning electron microscopy [Text] / A.G. Maslovskaya // Ferroelectrics. –2010. –Vol. 398. –P. 55–63.

3. **Алешин, В.И.** Моделирование переполяризации кристалла и керамики типа $BaTiO_3$ [Текст] / В.И. Алешин, А.Г. Лучанинов // Изв. АН. Сер.физ. –2001. –Т. 65. –№ 8. –С. 1114–1118.

4. **Нестеров, В.Н.** Моделирование на ЭВМ лапласового давления и его роль в некоторых процессах перестройки доменной структуры сегнетоэлектриков [Текст] / В.Н. Нестеров, А В. Шильников. –XIV

Всерос. конф. по физике сегнетоэлектриков, 1995. –С. 340.

5. **Parlunski, K.** Domain pattern formation near phase transition – challenge for computer simulations [Text] / K. Parlunski // Ferroelectrics. –1997. –P. 245–253.

6. **Донцова, Л.И.** Плотность поверхностной энергии и спонтанное движение доменных стенок в кристаллах ТГС [Текст] / Л.И. Донцова, Э.С. Попов // Изв. АН СССР. Сер. физ. –1975. –Т. 39. –С. 854–856.

7. **Нечаев, В.Н**. Макроскопическая динамика доменных и межфазных границ в сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках-сегнетоэлектриках [Текст] / В.Н. Нечаев, А.М. Рощупкин // Изв. РАН. Сер. Физ. 1995. –Т.59. –№ 9. –С. 11–25.

8. **Лайнс, М.** Сегнетоэлектрики и родственные им материалы [Текст] / М. Лайнс, А. Гласс. –М.: Мир, 1981. –736 с.

9. **Черноусько, Ф.Л.** Вариационные задачи механики и управления [Текст] / Ф.Л. Черноусько, Н.В. Баничук. –М.: Наука, 1973. –240 с.

10. **Масловская, А.Г.** Упорядоченное движение доменных границ сегнетоэлектрических кристаллов в неоднородном тепловом поле [Текст] / А.Г. Масловская, Е.А. Ванина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Физико-математические науки. –2010. –№ 2 (98). –С. 7–11.

УДК 65.015.13:51-74

*И.В. Гончар, П.И. Падерно*
*Санкт-Петербург, Россия*

# УПРАВЛЕНИЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИМ РЕИНЖИНИРИНГОМ РАБОЧИХ МЕСТ

*I.V. Gonchar, P.I. Paderno*
*St.-Petersburg, Russia*

# ERGONOMIC REENGINEERING MANAGEMENT OF WORK PLACE

Рассмотрен процесс эргономического реинжиниринга рабочих мест – одного из наиболее эффективных и экономически выгодных способов оптимизации объектов. Формализована модель управления эргономическим реинжинирингом. Предложен ряд подходов к построению шкал для анализа важности отдельных элементов рабочего места.

УПРАВЛЕНИЕ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. ЭРГОНОМИЧЕСКИЙ РЕИНЖИНИРИНГ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОЦЕНКА ВАЖНОСТИ. КАЧЕСТВЕННЫЕ ШКАЛЫ. РАБОЧЕЕ МЕСТО.

In the article the process of ergonomic reengineering of work places, as one of the most effective and economic ways of optimization of objects, is considered. The model of ergonomic reengineering management is formalized. A number of ways for creating the scales for the analysis of importance of separate elements of the work place is offered.

MANAGEMENT. EFFICIENCY. ERGONOMIC REENGINEERING. MODELLING. IMPORTANCE ASSESSMENT. QUALITATIVE SCALES. WORK PLACE.

В последние годы фактор эргономичности рабочего места (РМ) стал цениться выше, чем наличие социального пакета, престижность компании, местоположение офиса. Большинство работников считают, что эффективность их труда напрямую зависит от эргономичности и удобства рабочего места [1]. По статистике лишь 2 % респондентов не верят в значимость комфортных условий для работы. Из 3 888 россиян, участвовавших в последних социологических исследованиях, затрагивающих вопросы организации рабочего места, 90 % назвали комфорт и удобство офисного пространства важнейшим элементом мотивации сотрудников [1]. Для наглядного представления о повышении эффективности работы сотрудника и организации в целом при использовании эргономичных РМ, имеется следующая статистика, приведенная в [2].

1. Повышение общей эффективности работы – 15–30 %.
2. Сокращение времени адаптации сотрудника – в 1,5–2 раза.
3. Сокращение времени выполнения рабочих функций – на 10–40 %.
4. Повышение точности и безошибочности работы – на 50–55 %.
5. Повышение производительности труда – на 13–27 %.
6. Повышение работоспособности – на 30–50 %.
7. Сокращение уровня заболеваемости – на 7–25 %.
8. Сокращение числа аварий и катастроф (по данным США) – на 50–55 %.
9. Сокращение трудозатрат на разработку средств взаимодействия человека с РМ – на 10–20 %.
10. Сокращение эргономических недостатков на рабочем месте – на 80 %.
11. Экономический эффект на 1 руб. затрат за год – 25–30 коп.

Проектирование эргономичных рабочих мест «с нуля» уже является достаточно изученной областью [3–5] и в наши дни перед специалистами в области человеческого фактора и эргономики стоит более сложная задача – формализовать, смоделировать и математически описать процесс эргономического реинжиниринга (ЭР), т. е. перепроектирования уже существующих рабочих мест при установленных ресурсах и определенных условиях. Сложность заключается в том, что ЭР непосредственно затрагивает прикладные

аспекты теории управления, математической статистики, антикризисного менеджмента, психологии, экономической теории и пр. [6]

### Процесс эргономического реижиниринга

В первую очередь при формализации процесса ЭР следует определить и проанализировать его основные составляющие. ЭР в общем случае описывают следующие четыре множества.

1. *Базовое состояние* $\overline{W}_0$. Описывает исходное состояние РМ в начале процесса ЭР; образовывается основными *разнородными* элементами РМ $\omega_i$, такими, как кресло, рабочее пространство, рабочая поверхность и пр. [7] Таким образом, базовое значение $\overline{W}_0 = \bigcup_{i=1}^{n} \omega_i$.

2. *Множество глобально приемлемых результатов* $W_R$. Включает в себя совокупность результатов ЭР, при которых РМ приобретает минимально-достаточное удобное состояние в результате ЭР.

3. *Итоговое значение* $\overline{W}_V$ Описывает РМ по результатам ЭР; определяется теми же разнородными элементами РМ $\omega_{vi}$, *уже* подвергшимися ЭР. Если $\overline{W}_V \in W_R$, то результат ЭР приемлем, если $\overline{W}_V \notin W_R$, то ЭР следует повторить. Итоговое значение $\overline{W}_V = \bigcup_{i=1}^{n} \omega_{vi}$.

4. *Проекты* $\overline{R}$ являются совокупностью воздействий ЭР на рабочее место и его элементы. Определяют длительность, ресурсозатратность стоимость и пр. процесса ЭР : $\overline{R} = (R_1, R_2, ..., R_K)$.

Весь процесс ЭР представлен на рис. 1 и может быть описан следующим выражением: $\overline{W}_0 \xrightarrow{\overline{R}} \overline{W}_V \in W_R$.

Применяемая при ЭР рабочих мест общая последовательность решения комплекса задач разделяется на три основных этапа: рабочий проект, реализацию, внедрение. Этапы включают в себя 14 стадий, часть которых являются очевидными и не нуждаются в формализации и моделировании. Начальной стадией ЭР является «Анализ исходных данных», общий алгоритм которой, представлен на рис. 2. Эта стадия главная в управлении эргономическим реинжинирингом и требует особого внимания.

### Субъекты управления эргономическим реинжинирингом

Управление ЭР осуществляется субъектами, задействованными в процессе, которыми являются: лицо, принимающее решение со стороны заказчика (ЛПР$_З$), и лицо, принимающее решение со стороны исполнителя (ЛПР$_И$).

ЛПР$_З$ обладает определенными функциями управления и по каждой принимает решение. Таким образом, можно проводить оценку и выявлять лучший исход по каждому его управленческому решению. К функциям ЛПР$_З$ относятся: формулировка целей, задач и предпочтений, выделение ресурсов, анализ рынка поставщиков, согласование работ и подписание результатов. ЛПР$_З$ вправе акцентировать внимание на наиболее важных и отбрасывать незначимые функции.

Весь спектр функций ЛПР$_З$ при проведении ЭР может быть описан с помощью совокупности кортежей $\langle d_{q1}, d_{q2}, ..., d_{ql} \rangle$, $\langle b_{q1}, b_{q2}, ..., b_{qk} \rangle$, $\langle t_{q1}, t_{q2}, ..., t_{qn} \rangle$, $\langle s_{q1}, s_{q2}, ..., s_{qm} \rangle$, $\langle v_{q1}, v_{q2}, ..., v_{qr} \rangle$ либо составным кортежем $\langle d_{q1}, d_{q2}, ..., d_{ql}, b_{q1}, b_{q2}, ..., b_{qk}, t_{q1}, t_{q2}, ..., t_{qn}, s_{q1}, s_{q2}, ..., s_{qm}, v_{q1}, v_{q2}, ..., v_{qr} \rangle$, где $D = \{d_{q1}, d_{q2}, ..., d_{ql}\}$ –

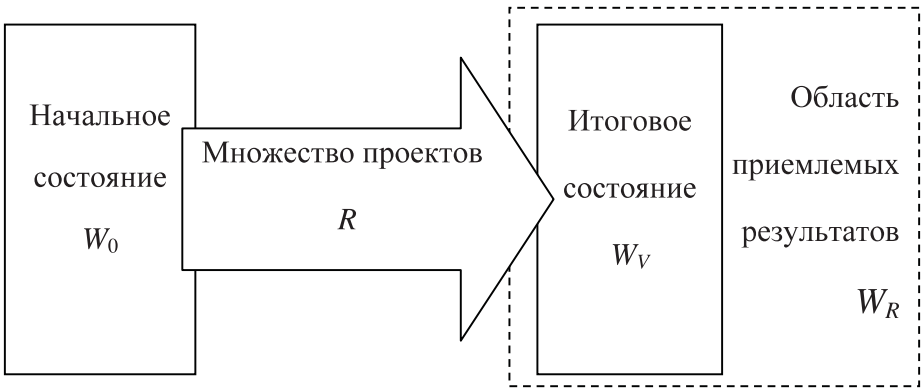



Рис. 1. Процесс эргономического реинжиниринга

Рис. 2. Анализ исходных данных

множество управленческих решений, определяющих целесообразность проведения ЭР, а также его масштаб и глубину; $B = \{b_{q1}, b_{q2}, ..., b_{qk}\}$ – множество решений по формулировке целей, основных задач ЭР и различных предпочтений, обеспечивающих корректность процесса принятия решений; $T = \{t_{q1}, t_{q2}, ..., t_{qn}\}$ – множество решений по выделению ресурсов (финансовых, кадровых, временных) на проведение работ; $S = \{s_{q1}, s_{q2}, ..., s_{qm}\}$ – множество решений при анализе рынка поставщиков эргономических услуг, определении конкретного исполнителя работ и взаимодействии с ним; $V = \{v_{q1}, v_{q2}, ..., v_{qr}\}$ – множество при согласовании работ и подписании результатов выполненных услуг.

ЛПР$_И$ – представитель исполнителя – компании, имеющей достаточную квалификацию и необходимые знания для выполнения эргономических работ. В идеальном варианте исполнители, т. е. поставщики услуг – сертифицированные эргономисты, эксперты тех областей, которые затрагиваются при проведении реинжиниринга. Коллектив поставщиков услуг состоит из руководителя, группы исполнителей и экспертной комиссии. Как правило, руководитель компании является ЛПР$_И$ и выполняет следующие функции: ведет переговоры с заказчиком, отвечает за выполнение работ, управляет своими сотрудниками, контролирует процесс реализации реинжиниринга, обеспечивает эффективную работу рабочей группы и пр. Анализ важности элементов рабо-

чего места, как и ряд других отдельных функций управления $ЛПР_И$, требует подробного разбора и формализации.

**Анализ важности элементов рабочего места**

Анализ важности элементов целесообразно проводить в самом начале процесса ЭР. Это обусловлено необходимостью формирования некоторого «единого языка» для всех участников процесса ЭР в отношении важности тех или иных элементов. Анализ важности элементов рабочего места заключается в ранжировании этих элементов в соответствии с заранее определенной шкалой, как очень значимый (высокая важность), значимый (средняя важность), незначимый и др. Таким образом, возникает необходимость формирования некоторых *качественных шкал* для определения важности того или другого элемента.

Качественные шкалы при анализе важности элементов РМ могут быть трехинтервальными, четырехинтервальными, пятиинтервальными и др. Использование шкал с числом интервалов более пяти нецелесообразно, ввиду возможного возникновения терминологической путаницы.

При выборе (формировании) той или иной шкалы следует отчетливо представлять, что полученные качественные значения в процессе последующей комплексной оценки будут переводиться в некоторые числовые значения, т. е. заранее следует определить некоторые числовые границы для качественных шкал.

Если важности всех элементов одинаковы, то средняя значимость (вес) элемента равна $1/n$ , где $n$ – число элементов.

Сформулируем *принцип симметричности* для определения числовых границ для качественных шкал.

Если в некоторой шкале имеется граница Г, то в этой же шкале должна быть и симметричная ей, в смысле среднего геометрического, относительно средней значимости элементов, граница Г*, такая, что выполняется соотношение $\Gamma \cdot \Gamma^* = \left(\frac{1}{n}\right)^2$.

Симметричной границей для 1 (абсолютная важность) является нуль, т. к. оба этих показателя недостижимы. Поэтому шкалы на рис. 3–5 имеют открытые левый и правый концы.

После выбора шкалы и формирования соответствующих границ производится *словесное* отнесение каждого из основных элементов РМ $\omega_i$, $i = 1, 2, ..., n$ к тому или иному интервалу.

Граничные значения могут быть выбраны либо $\Gamma_1 = 3/2n$, либо $\Gamma_1 = 2/n$. Тогда граница $\Gamma_1^*$ будет по принципу симметричности определяться по формулам $\Gamma_1^* = 2/3n$, либо $\Gamma_1^* = 1/2n$ соответственно. Первый вариант, по-видимому, более адекватен и избирателен, т. к. во втором случае в интервал ($\Gamma_1^*$, $\Gamma_1$), т. е. интервал ($1/2n$, $2/n$), могут попасть практически все элементы и шкалу придется корректировать заново. Вариант трехинтервальной шкалы целесообразно использовать в тех случаях, когда число элементов сравнительно невелико $m = 5 \div 10$.

Граничные значения могут быть выбраны

| Неважные | Средневажные | Важные |
|---|---|---|
| | $\Gamma_1^*$ | $\Gamma_1$ |

Рис. 3. Трехинтервальная шкала важностей элементов

| Неважные | Маловажные | Важные | Очень важные |
|---|---|---|---|
| | $\Gamma_1^*$ | $\Gamma_0$ | $\Gamma_1$ |

Рис. 4. Четырехинтервальная шкала важностей элементов
Центр шкалы $\Gamma_0 = 1/n$

| Неважные | Маловажные | Средневажные | Важные | Очень важные |
|---|---|---|---|---|
| 0 | $\Gamma_2^*$ | $\Gamma_1^*$ | $\Gamma_1$ | $\Gamma_2$ 1 |

Рис. 5. Пятиинтервальная шкала важностей элементов

либо $\Gamma_1 = 2/n$, либо $\Gamma_1 = 3/n$. Тогда граница $\Gamma_1$* будет по принципу симметричности определяться по формулам $\Gamma_1$*= $1/2n$, либо $\Gamma_1$* = $1/3n$ соответственно.

При выборе $\Gamma_1$ следует руководствоваться не только числом элементов, но и количеством элементов, попадающих в категорию очень важных, число которых не должно составлять более 10–15 % от числа всех показателей, но и не должно равняться нулю.

Данная шкала обобщает трех- и четырехинтервальные шкалы. Граничное значение для $\Gamma_1$ целесообразно выбрать $\Gamma_1 = 3/2n$, тогда граница $\Gamma_1$* будет по принципу симметричности определяться как $\Gamma_1$* = $2/3n$. Граничное значение для $\Gamma_2$ целесообразно выбрать $\Gamma_2 = 3/n$, тогда граница $\Gamma_2$* будет по принципу симметричности определяться как $\Gamma_2$* = $1/3n$. Заметим, что $\Gamma_2/\Gamma_1 = 2$, $\Gamma_1/\Gamma_1$* = 2,25. Таким образом, разделение на очень важные, важные и средневажные элементы с выбранными границами имеет понятное (прозрачное) обоснование.

При выборе той или иной качественной шкалы целесообразно принимать во внимание следующие факторы:

1) количество элементов;

2) разброс количественных значений важности;

3) наличие очень значимых элементов, их количество и разброс значений;

4) количество малозначимых и незначимых элементов.

Если число элементов сравнительно невелико (5–10) и имеет место не очень большой разброс их важностей (значимостей), то имеет смысл выбрать трехинтервальную шкалу. Выбор значения для границы $\Gamma_1$ целесообразно осуществлять так, чтобы в число важных попало не более одного – двух элементов (10–20 % всех элементов), а в число средневажных – 20–50 % всех элементов.

Если число элементов не очень велико (10–20), а значимости имеют большой разброс, то можно выбрать как трехинтервальную, так и четырехинтервальную шкалу, хотя выбор последней представляется более предпочтительным. При выборе четырехинтервальной шкалы встает вопрос об определении соответствующего значения границы $\Gamma_1$, определяющего шкалу. Если есть очень значимые элементы, то целесообразно выбрать $\Gamma_1 = 3/n$, чтобы их отделить от остальных, в противном случае лучше выбрать $\Gamma_1 = 2/n$, чтобы в категорию очень важных попало не более 10–15 % всех элементов. Тогда граница $\Gamma_1$* будет по принципу симметричности $\Gamma_1$* = $1/3n$, либо $\Gamma_1$* = $1/2n$ соответственно.

Если число элементов велико (более 20), то целесообразно использовать пятиинтервальную шкалу. Выбирая $\Gamma_1 = 3/2n$, $\Gamma_2 = 3/n$ обычно получают, что число очень важных элементов мало́ – не более 10 %, важных также не очень много (10–15%), средневажных около 10–20 %, а остальные попадают в категории маловажных и неважных, т. е. не являются сильно определяющими. Заметим, что $\Gamma_1$* = $2/3n$, $\Gamma_2$* = $1/3n$.

Применение эргономического реинжиниринга является удобным и эффективным средством повышения комфортности рабочих мест при минимальных ресурсных затратах. Поставлена задача оптимизации отдельных управленческих функций заказчика и исполнителя реинжинирнга. На основании приведенного выше примера постановки эргономического реинжиниринга можно выявить пути улучшения процесса. Показан способ формализации процессов ЭР на примере анализа важности элементов рабочего места, при котором происходит ранжирование в соответствии с представленными шкалами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Падерно, П.И.** Реинжиниринг офисных рабочих мест: социальные, организационные и эргономические аспекты [Текст] / П.И. Падерно, И.В. Гончар, А.С. Головина // Государство и бизнес. Вопросы теории и практики: моделирование, менеджмент, финансы: Матер. III Междунар. конф. –СПб.: Изд-во СЗАГС, 2011.

2. **Львов, В.М.** Эргономика для инженеров [Текст] / В.М. Львов, П.Я. Шлаен. –Тверь: Изд-во ТвГУ, 2004.

3. **Сергеев, С.Ф.** Инженерная психология и эргономика: Учеб. пособие [Текст] / С.Ф. Сергеев. –М.: НИИ школьных технологий, 2008.

4. **Львов, В.М.** Словарь эргономических терминов, понятий и определений [Текст] / В.М. Львов, П.Я. Шлаен, А.А. Голубев. –Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2010.

5. **Смирнов, Б.А.** Инженерно-психологическое и эргономическое проектирование [Текст] / Б.А. Смирнов, Ю.И. Гулый. –Х.: Изд-во «Гуманитарный центр», 2010.

6. **Хаммер, М.** Реинжинирнг корпорации: Манифест революции в бизнесе [Текст] / М. Хаммер, Д. Чампи. –М.: Манн, Иванов и Фербер, 2011.

7. **Прусенко, Б.Е.** Аттестация рабочих мест: Учеб. пособие [Текст] / Б.Е. Прусенко, Е.Б. Сажин, Н.Н. Сажина. –М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2004.

8. **Губинский, А.И.** Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания. Справочник [Текст] / А.И. Губинский, В.Г. Евграфов. –М.: Машиностроение, 1993.

9. **Мунипов, В.М.** Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды: Учебник [Текст] / В.М. Мунипов, В.П. Зинченко. –М.: Логос, 2001.

УДК 621.396.6

*Д.В. Морозов, М.С. Енученко*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С УНАРНОЙ И СЕГМЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРАМИ

*D.V. Morozov, M.S. Yenuchenko*
*St.-Petersburg, Russia*

# DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS WITH UNARY AND SEGMENTED ARCHITECTURES

Рассмотрены унарная, бинарная и сегментная архитектуры ЦАП, проведено сравнение. Сделан вывод о целесообразности использования сегментной архитектуры при необходимости снижения требований к согласованию параметров элементов.

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ. ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ ДЕШИФРАТОР. СЕГМЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА.

Unary, binary and segmented architectures were presented. Comparison of architectures was conducted. Segmented architecture provides decreasing element mismatch.

DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER. THERMOMETRIC DECODER. SEGMENTED ARCHITECTURE.

Одна из основных составляющих систем телекоммуникаций и управления – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Как правило, ЦАП является встраиваемым блоком данных систем, что приводит к необходимости уменьшения занимаемых размеров на кристалле при сохранении прочих характеристик. Наиболее простой способ построения параллельного ЦАП – использование взвешивающих элементов, имеющих веса, относящиеся как степени числа два, – бинарная архитектура. Данный подход не требует использования дополнительных блоков, т. к. взвешивающие элементы непосредственно управляются сигналами разрядов входного прямого двоичного кода. Однако этот подход требует высокой точности исполнения взвешивающих элементов и, в первую очередь, элемента, взвешивающего старший разряд: отклонение старшего взвешивающего элемента не должно превышать половины веса младшего значащего разряда (МЗР). Так, для 10-разрядного ЦАП это относительное отклонение не должно превышать $\frac{0,5}{2^9} = 0,098$ %.

Достижение такой точности исполнения возможно лишь увеличением геометрических размеров элементов и всей площади в целом с целью уменьшения влияния краевых эффектов, однако и в таком случае возможна потеря точности за счет увеличения влияния неоднородности кристалла. В данной статье рассматриваются альтернативные способы построения ЦАП, позволяющие решить проблему точности исполнения элементов: использование унарной и сегментной архитектур [1–3].

### Унарная архитектура

Альтернативным подходом по отношению к бинарной архитектуре является применение унарной архитектуры, где используются эле-

менты одинакового веса, число которых для $N$-разрядного ЦАП равно $2^N - 1$. Схемы ЦАП с бинарной и унарной архитектурами представлены на рис. 1. Бинарная архитектура представлена двоично-взвешенными источниками тока $I$, $2I$, $4I$ и т. д., где $I$ – ток, соответствующий младшему разряду. Унарная архитектура содержит одинаковые источники тока с весом $I$. Обе схемы имеют токовый выход, суммирование токов происходит в выходном узле.

Управление элементами в унарной архитектуре осуществляется $2^N - 1$-разрядным термометрическим кодом. По аналогии со шкалой термометра минимальное число в данном коде представляется во всех разрядах логическими нулями, а максимальное – логическими единицами. В диапазоне входных сигналов ЦАП младшие разряды термометрического кода принимают значения логической единицы, а старшие – логического нуля (код на выходах компараторов в параллельном аналого-цифровом преобразователе является примером термометрического кода [4]). Управление источниками тока таким кодом гарантирует монотонность характеристики преобразования и снижает требования к точности исполнения. Так, для унарной архитектуры это требование составляет для каждого элемента (аналогично бинарной) половину МЗР, но т. к. все элементы считаются младшими, то относительное отклонение уже будет составлять 50 % вне зависимости от разрядности ЦАП.

Так как в случае унарной архитектуры управление взвешенными элементами ведется с помощью термометрического кода, то для преобразования прямого двоичного кода в термометрический необходим термометрический дешифратор. Строго говоря, такое устройство называется *кодопреобразователем* [5], однако нередко в публикациях используют термин «дешифратор» [1–4, 6–8]. Способы построения и возможные реализации дешифратора термометрического кода рассматриваются в следующем разделе.

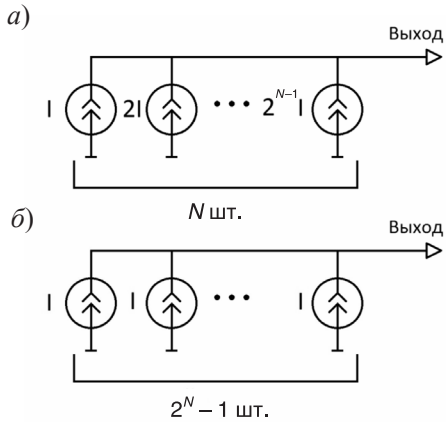



Рис. 1. Бинарная (*а*) и унарная (*б*) архитектуры

### Термометрический дешифратор

**Одномерный дешифратор.** В термометрическом коде десятичное число $n$ представляется в виде $n$ единиц, остальные разряды принимаются равными нулю, или наоборот, т. е. в виде $n$ нулей, остальные – единицы. Был проведен синтез трехразрядного термометрического дешифратора на основе таблицы истинности (рис. 2). Из таблицы истинности нетрудно заметить, что разряд выходного кода $Y4$ повторяет старший разряд входного кода $X3$, а разряды $Y7$ и $Y1$ являются логическим произведением и суммой всех разрядов входного кода соответственно. Построив карты Карно для $Y6$ и $Y5$ и проведя минимизацию, логические функции с $Y1$ по $Y7$ можно представить в виде:

$$Y1 = X1 + X2 + X3 = (X3 + X1) + (X3 + X2);$$
$$Y2 = X3 + X2;$$
$$Y3 = (X3 + X2)\cdot(X3 + X1); Y4 = X3;$$
$$Y5 = X3\cdot X2 + X3\cdot X1;$$
$$Y6 = X3\cdot X2;$$
$$Y7 = X1\cdot X2\cdot X3 = (X3\cdot X2)\cdot(X3\cdot X1).$$

Каждый дешифратор разрядности $N$+1 строится на основе двух дешифраторов разрядности $N$. На входы дешифратора, отвечающего за младшие разряды, подаются логические суммы $N$-х разрядов и $N$+1-го, на входы дешифратора, отвечающего за старшие разряды, подаются логические произведения $N$-х разрядов и $N$+1-го.

Количество логических элементов такого термометрического дешифратора вычисляется по формуле:

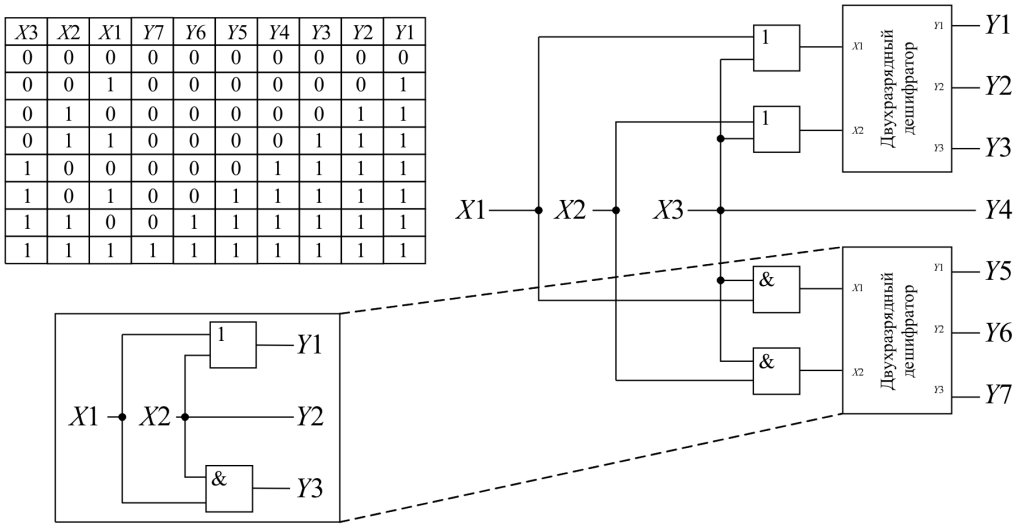
$$k_{1D}\ (N) = 2^{N+1} - 2N - 2, \qquad (1)$$

где $N$ – разрядность входного двоичного кода дешифратора. Так, для 6-разрядного дешифратора потребуется 114 логических элементов, для 8-разрядного – 494.

Усредненное время задержки срабатывания данного устройства равно

$$t_{1D} = (N - 1)\tau, \qquad (2)$$

где $\tau$ – время задержки срабатывания одного ло-



| X3 | X2 | X1 | Y7 | Y6 | Y5 | Y4 | Y3 | Y2 | Y1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |



Рис. 2. Структура и таблица истинности трехразрядного термометрического дешифратора

гического элемента. Такой дешифратор будем называть *одномерным*.

**Двумерный дешифратор.** Структура *двумерного* дешифратора на примере четырех разрядов входного кода представлена на рис. 3 [4–6]. Такой дешифратор строится на базе двух дешифраторов разрядности $N/2$ и имеет в каждой ячейке комбинацию логических элементов, работающих следующим образом: выходной сигнал ячейки принимает значение единицы, если ячейка находится на пересечении текущей строки $Y_i$ и текущего столбца $Y_j$ или если выбрана следующая строка $Y_{i+1}$.

В случае двумерного дешифратора формулы числа элементов и времени задержки срабатывания принимают вид:

$$k_{2D}\ (N) = k_{1D}\ (N/2)\cdot 2 + 2\cdot(2^N - 1) = \\ = k_{1D} + 2^{\frac{N}{2}+2} - 4. \quad (3)$$

$$T = (\frac{N}{2} + 1)\tau. \quad (4)$$

В сравнении с одномерным дешифратором (1) и (2), для двумерного дешифратора требуется большее число логических элементов, но сокращается время срабатывания устройства.

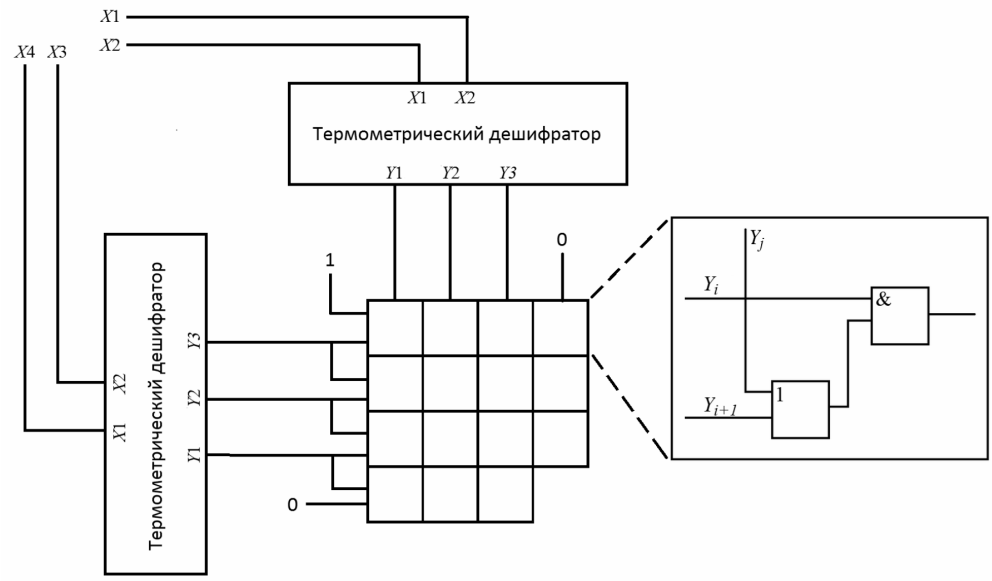




Рис. 3. Структура двумерного дешифратора

Таблица 1

**Сравнение способов дешифрирования**

| Число логических элементов | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Дешифрирование | Разрядность | | | | | |
| | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 |
| Одномерное | 22 | 114 | 494 | 2026 | 8166 | 131038 |
| Двумерное | 34 | 142 | 554 | 2150 | 8418 | 132058 |
| Увеличение числа элементов, % | 54 | 24 | 12 | 6 | 3 | 1 |
| Максимальная задержка (в единицах задержки одного элемента) | | | | | | |
| Одномерное | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 15 |
| Двумерное | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 |
| Увеличение быстродействия, % | 0 | 25 | 40 | 50 | 57 | 67 |

Сравнение способов дешифрирования по количеству элементов и быстродействию представлено в табл. 1.

С ростом разрядности число логических элементов становится сопоставимым, а быстродействие двумерного дешифратора растет. Например, для 16-разрядного двумерного дешифратора увеличение числа элементов относительного одномерного дешифратора лишь на 1 % дает 67 % выигрыш в быстродействии.

**Реализация дешифратора с параллельным формированием выходных функций.** Помимо рекурсивного способа построения термометрического дешифратора есть вариант реализации для всех выходов, кроме $Y8$, в точности повторяющего старший бит входного кода, параллельным формированием выходных функций. Так, для четырехразрядного дешифратора выходные функции приобретают следующий вид:

$$Y1 = \overline{\overline{X4 + X3} \cdot \overline{X2 + X1}};\ Y2 = X2 + X3 + X4;$$

$$Y3 = \overline{\overline{X1 \cdot X2} \cdot \overline{X3 + X4}};\ Y4 = \overline{\overline{X3 + X4}};$$

$$Y5 = \overline{\overline{X1 \cdot X3} \cdot \overline{(X4 + X3) \cdot (X4 + X2)}};$$

$$Y6 = \overline{\overline{X4 + X3} \cdot \overline{X4 + X2}};$$

$$Y7 = \overline{\overline{X1 + X4} + \overline{(X4 + X3) \cdot (X4 + X2)}};$$

$$Y9 = \overline{\overline{X1 \cdot X4} \cdot \overline{X4 \cdot (X2 + X3)}};$$

$$Y10 = \overline{\overline{X4 \cdot (X2 + X3)}};$$

$$Y11 = \overline{\overline{X1 + X3} + \overline{X4 \cdot (X2 + X3)}};$$

$$Y12 = \overline{\overline{X3 \cdot X4}};\ Y13 = \overline{\overline{X1 + X2} + \overline{X3 \cdot X4}};$$

$$Y14 = X2 \cdot X3 \cdot X4;$$

$$Y15 = \overline{\overline{X4 \cdot X3} + \overline{X2 \cdot X1}}.$$

Данный подход позволяет при изменении всех разрядов входного кода из состояния 0 в состояние 1 и обратно сблизить времена задержки срабатывания дешифратора. При этом достигается уменьшение числа транзисторов в 1,4 раза, и среднее время преобразования сокращается в 1,3 раза.

### Сегментная архитектура

Сегментная архитектура представляет компромисс между унарной и бинарной архитектурой. В этом случае ЦАП разбивается на сегменты: бинарный и унарный. В связи с описанными выше проблемами точности исполнения старшие разряды обрабатываются унарным сегментом, младшие – бинарным.

Чтобы показать, как точность исполнения элементов влияет на характеристики ЦАП, проведем моделирование дифференциальной нелинейности для различных архитектур в среде MATLAB. При этом введем следующее предположение: взвешивающие элементы бинарной архитектуры строятся параллельным соединением необходимого числа элементов единичного веса. Тогда ЦАП с любой архитектурой будет иметь одинаковое число элементов $K$ единичного веса, равное $K = 2^N - 1$, где $N$ – разрядность ЦАП. Дополнительно предположим, что площади элементов единичного веса ЦАП для указанных архитектур одинаковы. Исследование проведем для 8-разрядных ЦАП. В сегментном ЦАП унарный сегмент обрабатывает четыре старших разряда, бинарный – четыре младших.

В модели генерируется массив элементов единичного веса, имеющих значения выходной характеристики (например, разрядного тока) в виде нормально распределенной случайной величины с математическим ожиданием 1 и среднеквадратичным отклонением σ. Моделирование производится для трех значений σ в диапазоне от 0,01 до 0,1. На основе этого массива формируются унарный, бинарный и сегментный ЦАП. Получается статическая характеристика каждого ЦАП и вычисляется максимальная DNL каждого из преобразователей. Результаты проведенных статистических испытаний представлены в табл. 2.

Из табл. видно, что начиная с выборки $10^2$, расхождение составляет не более 5 %, а начиная с выборки $10^4$ – не более 1 %. Таким образом, дальнейшее увеличение выборки нецелесообразно. Также из таблицы видно, что дифференциальная нелинейность, связанная с разбросом параметров элементов, для ЦАП с унарной архитектурой в пять раз ниже, чем для ЦАП с бинарной архитектурой. Для сегментного ЦАП, обрабатывающего половину разрядов унарным сегментом, половину – бинарным сегментом, эта нелинейность составляет с точностью до 6 % среднее значение нелинейностей ЦАП с унарной и ЦАП с бинарной архитектурой.

В итоге можно сделать следующие выводы. При одинаковой площади взвешивающих элементов унарная архитектура проигрывает бинарной

Таблица 2

**Результаты моделирования разброса параметров бинарного и сегментного ЦАП**

| Средняя максимальная DNL | | | |
|---|---|---|---|
| Выборка | Унарный | Бинарный | Сегментный 4/4 |
| Среднее квадратичное отклонение σ 0,01 | | | |
| 1 | 0,0354 | 0,1631 | 0,1142 |
| 1,00E+01 | 0,0304 | 0,1656 | 0,1255 |
| 1,00E+02 | 0,0306 | 0,1657 | 0,1062 |
| 1,00E+03 | 0,0304 | 0,1686 | 0,1039 |
| 1,00E+04 | 0,0305 | 0,1643 | 0,1030 |
| 1,00E+05 | 0,0304 | 0,1652 | 0,1033 |
| Среднее квадратичное отклонение σ 0,05 | | | |
| 1 | 0,1435 | 0,6507 | 0,3804 |
| 1,00E+01 | 0,1410 | 0,8084 | 0,4460 |
| 1,00E+02 | 0,1529 | 0,8181 | 0,5377 |
| 1,00E+03 | 0,1518 | 0,8333 | 0,5223 |
| 1,00E+04 | 0,1521 | 0,8222 | 0,5180 |
| 1,00E+05 | 0,1521 | 0,8293 | 0,5172 |
| Среднее квадратичное отклонение σ 0,1 | | | |
| 1 | 0,2708 | 0,9223 | 0,9633 |
| 1,00E+01 | 0,2742 | 1,6638 | 0,8295 |
| 1,00E+02 | 0,2984 | 1,5972 | 1,0191 |
| 1,00E+03 | 0,3044 | 1,6813 | 1,0299 |
| 1,00E+04 | 0,3053 | 1,6655 | 1,0318 |
| 1,00E+05 | 0,3044 | 1,6556 | 1,0341 |

по площади, занимаемой всем преобразователем, потребляемой мощности, быстродействию, однако дает гарантированную монотонность характеристик преобразования и снижает требования к точности исполнения элементов.

Обеспечить указанные преимущества бинарной и унарной архитектур удается при использовании сегментной архитектуры. Как правило, разрядности бинарного и унарного сегментов оказываются близкими. При увеличении разрядности унарного сегмента достигается уменьшение дифференциальной нелинейности, связанной с разбросом параметров взвешивающих элементов, а при увеличении бинарного сегмента снижается занимаемая площадь, потребляемая мощность и увеличивается быстродействие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Radiom, S.** Folded-current-steering DAC: an approach to low-voltage high-speed high-resolution D/A converters [Text] / S. Radiom, B. Sheikholeslami, H. Aminzadeh [et al.] // IEEE International Symp. on Circuits and Systems. –2006. –P. 4783–4786.

2. **Hyuen-Hee, Bae.** A 3 V 12b 100 MS/s CMOS D/A converter for high-speed system applications [Text] / Bae Hyuen-Hee, Jin-Sik Yoon, Myung-Jin Lee [et al.] // Proc. of the International Symp. on Circuits and Systems, ISCAS ‘03. –2003. –Vol. 1. –P. I-869–I-872.

3. **Da-Huei, Lee.** Nyquist-Rate Current-Steering Digital-to-Analog Converters With Random Multiple Data-Weighted Averaging Technique and $Q^N$ Rotated Walk Switching Scheme [Text] / Lee Da-Huei, Yu-Hong Lin, Tai-Haur Kuo // IEEE on Circuits and Systems II: Express Briefs. –2006. –Vol. 53. –№. 11. –P. 1264–1268.

4. **Эннс, В.И.** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем [Текст]/ В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. –М.: Горячая линия – Телеком, 2005. –454 с.

5. **Бунтов, В.Д.** Цифровые и микропроцессорные радиотехнические устройства [Текст]/ В.Д. Бунтов, С.Б. Макаров. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2005. –398 с.

6. **Zhongjun, Yu.** 1-D and 2-D switching strategies achieving nearoptimal INL for thermometer-coded current steering DACs [Text] / Yu Zhongjun, Degang Chen, R. Geiger // ISCAS ‘03 Proceedings of the International Symp. on Circuits and Systems. –2003. –Vol. 1. –P. I-909–I-912.

7. **Da-Huei, Lee.** Low-Cost 14-Bit Current-Steering DAC With a Randomized Thermometer-Coding Method [Text] / Lee Da-Huei, Tai-Haur Kuo, Kow-Liang Wen // IEEE Transactions on Circuits and Systems. Part II: Express Briefs. –2009. –Vol. 56. –Iss. 2. –P. 137–141.

8. **Starzyk, J.A.** Cost-oriented design of a 14-bit current steering DAC macrocell [Text] / J.A. Starzyk, R.P. Mohn // Proc. of the International Symp. on Circuits and Systems, ISCAS ‘03. –2003. –Vol. 1. –P. I-965–I-968.

УДК 621.396.6

*Д.В. Морозов, Д.О. Буданов*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ШИФРАТОР ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО КОДА В ПРЯМОЙ ДВОИЧНЫЙ КОД

*D.V. Morozov, D.O. Budanov*
*St.-Petersburg, Russia*

# ENCODER OF THERMOMETRIC CODE TO STRAIGHT BINARY CODE

Предложено схемотехническое решение восьмиразрядного шифратора термометрического кода в прямой двоичный код. Проведенное компьютерное моделирование схем и сравнение с известными аналогами показало выигрыш по потребляемой мощности.

ШИФРАТОР. ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ КОД. ПРЯМОЙ ДВОИЧНЫЙ КОД. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Design of 8-bit encoder of termometrical code to direct binary code is presented. Power consumption is decreased that is shown by computer simulation results and comparison with other designs.

ENCODER. TERMOMETRICAL CODE. DIRECT BINARY CODE. COMPUTER SIMULATION.

## Постановка задачи

Неотъемлемой частью любой системы, выполняющей цифровую обработку сигналов, служат аналоговые устройства входного интерфейса. Одним из обязательных блоков интерфейсной части является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Скорость передачи информации в современных системах телекоммуникаций представляет критичный параметр. При этом наибольшим быстродействием отличаются АЦП параллельного преобразования (параллельные АЦП) [1–3]. Сопряженная часть любого параллельного АЦП – преобразователь кода с выходов массива компараторов в прямой двоичный код [1–7]. Строго говоря, такое устройство называется *кодопреобразователем* [1]. Однако нередко в отечественных [2, 3] и зарубежных [4–7] публикациях используют термин «шифратор» термометрического кода. В данном коде по аналогии со шкалой термометра минимальное число представляется во всех разрядах логическими нулями, а максимальное – логическими единицами. В диапазоне входных сигналов параллельного АЦП младшие разряды термометрического кода принимают значения логической единицы, а старшие – логического нуля. Несмотря на успехи, достигнутые в разработке таких шифраторов, актуальны схемотехнические решения с низкой потребляемой мощностью. Одно из возможных решений восьмиразрядного шифратора представлено в данной статье с использованием результатов моделирования в САПР Cadence Virtuoso для 180 нм КМОП-технологии.

## Разработка восьмиразрядного шифратора

Шифраторы с разрядностью выходного кода от четырех до восьми разрядов строятся на основе шифраторов более низкого порядка, например

Таблица 1

**Таблица истинности двухразрядного шифратора**

| *X*1 | *X*2 | *X*3 | *Y*1 | *Y*2 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

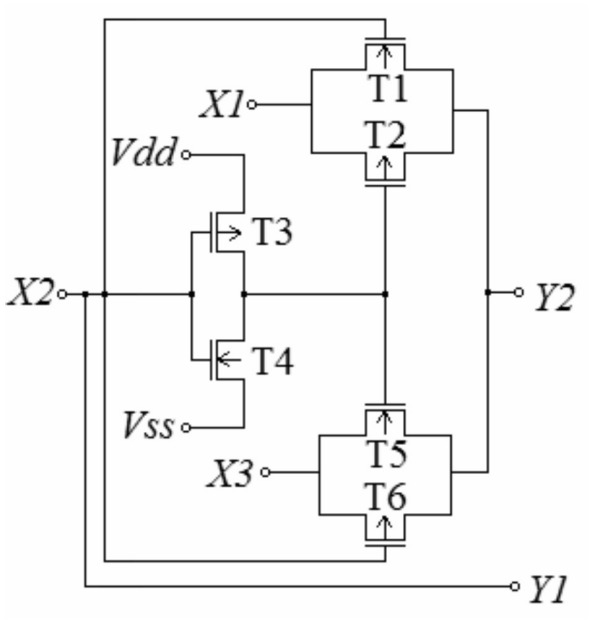



Рис. 1. Схема двухразрядного шифратора

второго, таблица истинности которого представлена в табл. 1. Схема данного шифратора показана на рис. 1 и разработана, исходя из соображений использования минимального числа элементов, что позволяет уменьшить занимаемую на кристалле площадь. Подложки МОП-транзисторов с *n*-каналом T1, T4 и T5 подключаются к отрицательной шине источника питания $V_{ss}$, а подложки МОП-транзисторов с *p*-каналом T2, T3 и T6 – к положительной шине $V_{dd}$.

Шифратор (рис. 1) состоит из двух КМОП-ключей на основе транзисторов T1, T2 и T5, T6, которые управляются напряжением на входе *X*2, определяющим старший разряд *Y*1 выходного двоичного кода. Входное напряжение *X*2 поступает с выхода компаратора, порог переключения которого соответствует середине диапазона входных напряжений двухразрядного АЦП. Ключи при этом коммутируют напряжения *X*1 и *X*3 с выходов оставшихся двух компараторов для формирования младшего разряда *Y*2 выходного двоичного кода АЦП. На основании предложенной схемы возможна реализация трехразрядного шифратора (рис. 2), где блок с обозначением CD – двухразрядный шифратор согласно рис. 1.

Действуя аналогично, получим схему четырехразрядного шифратора (рис. 3) на основе трехразрядных шифраторов (рис. 2). Для этого необходимо использование двухвходовых мультиплексоров с обозначением MUX, схема которых представлена на рис. 4. Подложки МОП-транзисторов с *n*-каналом T2, T4, T5, T6, T8 и T10 подключаются к отрицательной шине источника питания $V_{ss}$, а подложки МОП-транзисторов с *p*-каналом T1, T3, T7 и T9 – к положительной шине $V_{dd}$. Работа мультиплексора осуществляется по сигналу на адресном входе A. При сигнале на входе A, равном логической единице, на выход поступает сигнал со входа D1, а при сигнале A, равном логическому нулю, – со входа D2. Инверторы на основе транзисторов T7–T10 являются буферными элементами.

Таким образом, наращивая разрядность аналогично рис. 3, восьмиразрядный шифратор реа-

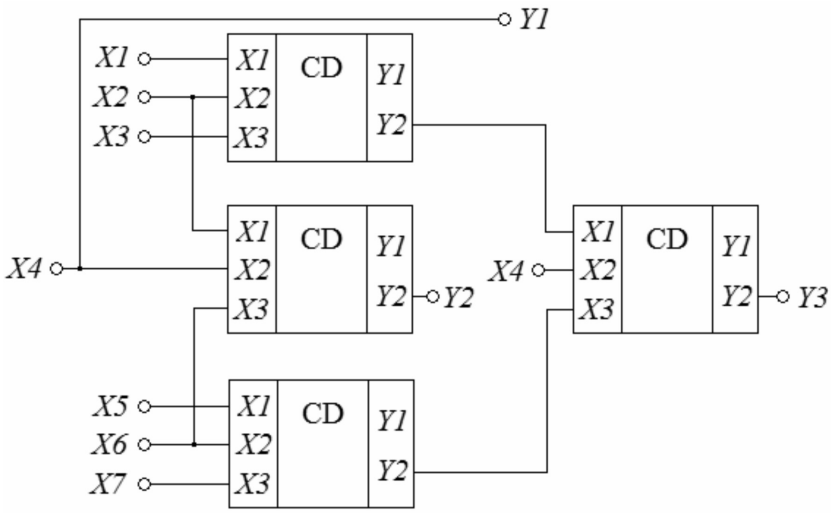



Рис. 2. Схема трехразрядного шифратора

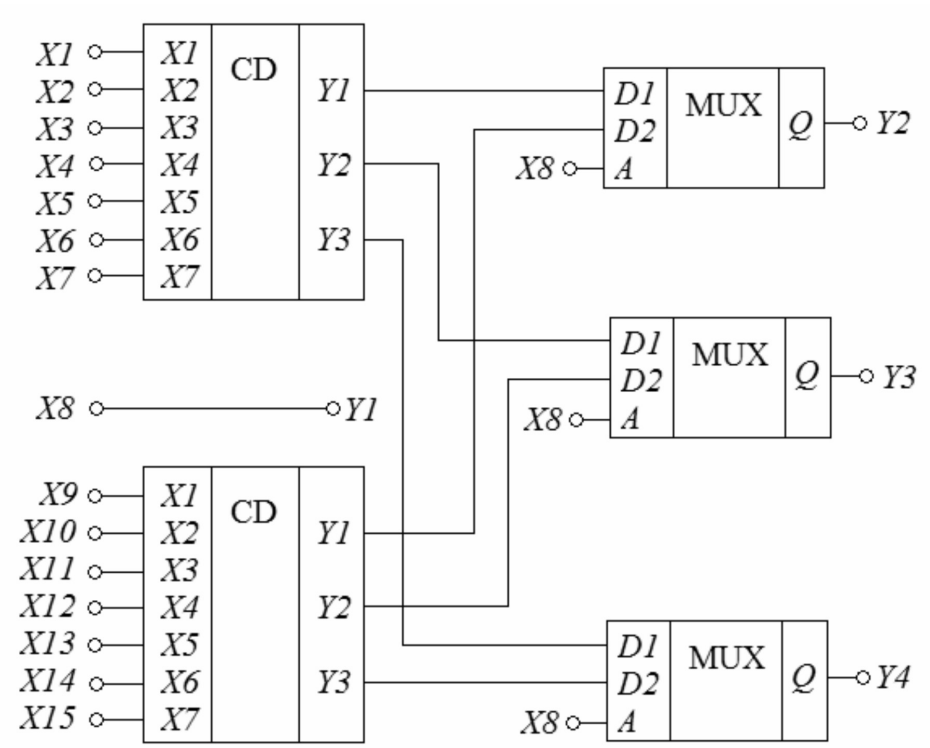



Рис. 3. Схема четырехразрядного шифратора

лизуется с использованием двух семиразрядных шифраторов и семи двухвходовых мультиплексоров.

### Моделирование восьмиразрядного шифратора

Моделирование временных и мощностных характеристик шифратора проводилось при помощи САПР Cadence Virtuoso на основе 180 нм КМОП-технологии компании UMC для однополярного питания 1,8 В.

Время задержки-переключения восьмиразрядного шифратора оценивалось по отклику на выходе младшего разряда *Y*8 прямого двоичного кода при изменении входного термометрического кода во всех 255 разрядах из логического нуля в логическую единицу (по фронту) и наоборот (по спаду), что обусловлено схемотехническим решением шифратора. Согласно представленным в предыдущем разделе схемам, наибольшее время задержки-переключения будет иметь младший разряд выходного прямого двоичного кода.

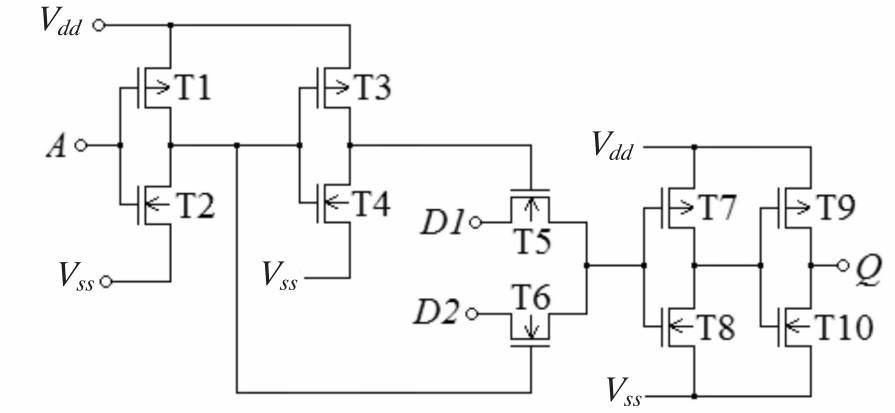



Рис. 4. Схема мультиплексора

Таблица 2

**Результаты моделирования шифратора**

| Условия | $T$, °C | Время задержки-переключения, пс | | Длительность фронта, пс | Длительность спада, пс | Потребляемая мощность, мкВт |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | «По фронту» | «По спаду» | | | |
| tt | –40 | 584 | 500 | 43 | 24 | 430 |
| | 27 | 640 | 570 | 50 | 29 | 442 |
| | 85 | 689 | 630 | 55 | 32 | 461 |
| ss | –40 | 881 | 673 | 59 | 31 | 411 |
| | 27 | 957 | 774 | 70 | 38 | 429 |
| | 85 | 1020 | 859 | 78 | 44 | 446 |
| ff | –40 | 431 | 398 | 33 | 19 | 446 |
| | 27 | 475 | 450 | 39 | 23 | 460 |
| | 85 | 513 | 496 | 43 | 26 | 485 |
| snfp | –40 | 666 | 512 | 44 | 24 | 469 |
| | 27 | 726 | 586 | 51 | 29 | 483 |
| | 85 | 778 | 649 | 56 | 34 | 504 |
| fnsp | –40 | 534 | 496 | 45 | 24 | 408 |
| | 27 | 588 | 563 | 52 | 28 | 425 |
| | 85 | 634 | 621 | 58 | 32 | 443 |
| Среднее значение | | 674 | 585 | 52 | 29 | 449 |
| Максимальное значение | | 1020 | 859 | 78 | 44 | 504 |

Моделирование проводилось при всех возможных граничных условиях (tt, ss, ff, snfp, fnsp) для трех значений температур –40 °C, 27 °C, 85 °C. Результаты представлены в табл. 2.

### Анализ результатов

На потребляемую мощность шифратора влияют разрядность, технология изготовления и тактовая частота. Выигрыш по потребляемой мощности представленного схемотехнического решения шифратора по сравнению с известными аналогами [6–10] возможно оценить на основе результатов моделирования. При этом необходимо осуществить пересчет потребляемой мощности сравниваемого шифратора ($P_{\text{сравн}}$) к эквивалентному шифратору, выполненному по тому же принципу, разрядностью 8 бит, изготовленному в 180 нм КМОП-технологии и имеющему тактовую частоту 1 ГГц. При этом токи потребления при пересчете считаются неизменными. Тогда изменение потребляемой мощности можно оценивать:

- при другой разрядности с помощью коэффициента $2^{N_{\text{экв}}-N_{\text{сравн}}}$, где $N_{\text{экв}}$ и $N_{\text{сравн}}$ – разрядности эквивалентного и сравниваемого шифраторов соответственно;
- при смене технологии – множителем $\frac{E_{\text{экв}}}{E_{\text{сравн}}}$, где $E_{\text{экв}}$ – напряжение питания шифратора, выполненного в 180 нм КМОП-технологии ($E_{\text{экв}}$ = 1,8 В), $E_{\text{сравн}}$ – напряжение питания сравниваемого шифратора;
- при изменении тактовой частоты – множителем $\frac{F_{\text{экв}}}{F_{\text{сравн}}}$, где $F_{\text{экв}}$ и $F_{\text{сравн}}$ – тактовые частоты эквивалентного разработанному и сравниваемого шифраторов соответственно.

Тогда эквивалентная потребляемая мощность определяется как

$$P_{\text{экв}} = 2^{N_{\text{экв}}-N_{\text{сравн}}} P_{\text{сравн}} \frac{E_{\text{экв}}}{E_{\text{сравн}}} \frac{F_{\text{экв}}}{F_{\text{сравн}}}.$$

При прочих равных условиях оценки выигрыша по потребляемой мощности разработанного схемотехнического решения шифратора по сравнению с известными аналогами представлены в

Таблица 3

**Выигрыш по потребляемой мощности**

| Шифратор | $P_{сравн}$, мВт | $N_{сравн}$, бит | $F_{сравн}$, ГГц | Технология, CMOS | Выигрыш, раз |
|---|---|---|---|---|---|
| [6] на основе полного сумматора | 0,138 | 5 | 0,1 | 0,18 μm | 24,6 |
| [6] на основе элементов памяти | 0,233 | | 0,1 | | 41,5 |
| [6] на основе мультиплексоров | 0,254 | | 0,1 | | 45,3 |
| [6] на основе логических элементов | 0,007 | | 0,1 | | 1,3 |
| [7] | 3,1 | 4 | 3,5 | 0,18 μm | 31,6 |
| | 4 | | 5 | | 28,5 |
| [8] | 0,438 | 8 | 2 | 0,07 μm | 1,3 |
| | 0,328 | 6 | 2,7 | | 2,8 |
| [9] | 0,185 | 4 | 5 | 0,09 μm | 2,4 |
| [10] | 0,67 | 6 | 2,5 | 0,18 μm | 2,4 |
| | 0,86 | | 3,3 | | 2,3 |

табл. 3. Минимальный выигрыш по потребляемой мощности получается для шифратора восьмиразрядного АЦП из [8]:

$$\frac{P_{экв}}{P_{разраб}} = \frac{0,438}{0,439}\frac{1,8}{0,7}\frac{1}{2} = 1,3 \text{ раза},$$

где $P_{разраб}$ – средняя потребляемая мощность разработанного шифратора.

Максимальный выигрыш по потребляемой мощности получается для шифратора [6] на основе мультиплексоров и составляет:

$$\frac{P_{экв}}{P_{разраб}} = 2^3\frac{0,254}{0,449}\frac{1}{0,1} = 45,3 \text{ раза}.$$

В статье предложено схемотехническое решение шифратора термометрического кода в прямой двоичный код. Осуществлено моделирование восьмиразрядной схемы в САПР Cadence Virtuoso для 180 нм КМОП-технологии при однополярном напряжении питания 1,8 В. Максимальное время задержки-переключения составляет около 1 нс, что позволяет использовать данную схему при обработке сигналов с тактовой частотой 1 ГГц наравне с имеющимися аналогами. Средняя потребляемая мощность не превосходит 500 мкВт. При прочих равных условиях достигается выигрыш по потребляемой мощности по сравнению с известными схемами до 40 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бунтов, В.Д.** Цифровые и микропроцессорные радиотехнические устройства [Текст]/ В.Д. Бунтов, С.Б. Макаров. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2005. –398 с.

2. **Эннс, В.И.** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем [Текст]/ В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. –М.: Горячая линия – Телеком, 2005. –454 с.

3. **Богатырев, Е.А.** Энциклопедия электронных компонентов. Большие интегральные схемы [Текст]/ Е.А. Богатырев, В.Ю. Ларин, А.Е. Лякин.; Под. ред. А.Н. Еркина. –М.: ООО «Макро Тим», 2006. —Т. 1. –224 с.

4. **Sall, E.** Comparison of Two Thermometer-to-Binary Decoders for High-Perfomance Flash ADCs [Text]/ E. Sall, M. Vesterbacka // NORCHIP Conference, 2005. –23rd. –Nov. 2005. –P. 253–256.

5. **Yoo, J.** Future-Ready Ultrafast 8 bit CMOS ADC for System-on-Chip Applications [Text] / J. Yoo, D. Lee, K. Choi [et al.] // ASIC/SOC Conf., 2001. Proc. 14th Annual IEEE International. –Sep. 2001. –P. 455–459.

6. **Madhumati, G.L.** Comparison of 5-bit Thermometer-to-Binary Decoders in 1,8 V, 0,18 μm CMOS Technology for Flash ADCs [Text] / G.L. Madhumati, K. Ramakoteswara Rao, M. Madhavilatha // 2009 International Conf. on Signal Processing Systems. –May 2009. –P. 516–520.

7. **Sheikhaei, S.** An Encoder For a 5 GS/s 4-Bit Flash ADC in 0.18 μm CMOS [Text] / S. Sheikhaei, S. Mirabbasi, A. Ivanov // Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conf. –May 2005. –P. 698–701.

8. **Yoo, J.** Quantum Voltage comparator for 0,07 μm CMOS flash A/D converters [Text] / J. Yoo, K. Choi, J. Ghaznavi // VLSI, 2003. Proc. IEEE Computer Society Annual Symp. –Feb. 2003. –P. 208–281.

9. **Hiremath, V.** An Ultra High Speed Encoder for 5GSPS Flash ADC [Text] / V. Hiremath, S. Ren // Instrumentation and Measurement Technology Conf. (I2MTC), 2010 IEEE. –May 2010. –P. 136–141.

10. **Nguyen, M.S.** Design and Implementation of Double Base Integer Encoder in the Flash ADC [Text] / M.S. Nguyen, J. Kim // Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conf. –May 2009. –P. 496–499.

УДК 65.011.46

*Ю.В. Куприянов, В.В. Таратухин*
*Москва, Россия*

# ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

*Yu.V. Kupriyanov, V.V. Taratoukhine*
*Moscow, Russia*

# FORMALIZED APPROACH FOR MANAGING THE ORGANIZATIONAL TRANSFORMATION IN THE COURSE OF DEPLOYING AN ENTERPRISE INFORMATION SYSTEM

Рассмотрен формализованный подход для определения рационального перечня методов управления организационной трансформацией, сопровождающей внедрение корпоративных информационных систем. Применение данного подхода позволит сократить стоимость соответствующих проектных работ и снизить риски достижения запланированных экономических результатов внедрения КИС.

УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ФУНКЦИЯ КАЧЕСТВА.

Within this paper authors develop formalized approach for managing IS-enabled organizational transformation with the use of multi-criteria decision making SMARTS method and fuzzy-sets theory. The provided approach is meant to assist in designing rational set of organizational change management measures during information system implementation project under the condition of cost and time limitations.

IS-ENABLED ORGANIZATIONAL TRANSFORMATION MANAGEMENT. INFORMATION SYSTEMS. HOUSE OF QUALITY. QFD.

Внедрение корпоративных информационных систем (КИС) есть проект организационной трансформации, т. к. помимо разворачивания технологической платформы требует выполнения ряда преобразований организационно-функциональных артефактов предприятия. Тем не менее руководители большинства проектов внедрения информационных систем концентрируются на технологической составляющей проекта, в то время как планирование и контроль получения запланированных экономических результатов остаются за рамками рассмотрения.

Эксперты и исследователи в своем большинстве сходятся на том, что информационные технологии оказывают существенное влияние на принципы работы производственных и сервисных организаций [1, 2]. Например, внедрение КИС класса ERP приводит к изменениям организационно-функциональной структуры, корпоративной культуры, общего уровня производительности, а также функциональных обязанностей, системы мотивации и продуктивности работы отдельных сотрудников [4]. Обращает на себя внимание тот факт, что причиной неудач проектов внедрения КИС в 75 % случаев становятся проблемы, вызванные не технологическими

факторами, а организационными изменениями, сопровождающими проект [1–3]. Последние есть необходимое условие реализации экономического эффекта от внедрения КИС. Основным подходом, направленным на решение этой проблемы, является совокупность методов, объединенных в методологию управления организационными изменениями на проектах внедрения КИС [6].

Цель статьи – разработка подхода повышения экономической эффективности внедрения КИС на крупных предприятиях за счет формализации процесса управления организационной трансформацией на основе применения элементов теории принятия решений и нечеткой логики при формировании перечня методов организационной трансформации.

## Цели и задачи управления организационной трансформаций при внедрении КИС

Проведенное нами исследование результатов внедрения КИС на базе решений SAP в период с 2004 по 2009 г. показало: основной объем экономических результатов в денежном выражении, превышающем 70 % совокупного экономического эффекта от внедрения КИС, обусловлен реализацией изменений бизнес-процессов, организационно-функциональной структуры, должностных обязанностей соответствующих штатных единиц предприятия, а не автоматизацией рутинных операций.

В рамках проектов внедрения КИС для обеспечения реализации упомянутых изменений осуществляется отдельный подпроект по управлению организационными изменениями, ассоциированный с выстраиванием проектных коммуникаций, планированием и реализацией обучения ключевых и конечных пользователей, оценкой воздействия проекта на всех заинтересованных лиц, построением технико-экономического обоснования и отслеживанием его исполнения через совокупность значений метрик эффективности процессов.

Реализуемые таким образом работы не являются самостоятельным инструментом по управлению организационными трансформациями, а применимы только в рамках проектов внедрения КИС; целесообразны для крупномасштабных проектов внедрения КИС с большим числом (> 300) конечных пользователей; осуществляются на всех этапах проекта внедрения КИС и являются его неотъемлемой частью.

Стоимость реализации подобного подпроекта в рамках проекта по внедрению КИС может составлять до 35 % его общей стоимости [6].

Для снижения затрат на реализацию обозначенного подпроекта рекомендуется использовать оригинальный формализованный подход управления организационной трансформацией – FOrTraM (Formalized Organization Transformation Management), позволяющий в рамках проекта внедрения КИС определить рациональный перечень методов по управлению организационными изменениями, отвечающий следующим принципам:

техническое развертывание информационной системы является необходимым, но не достаточным условием получения запланированных экономических результатов внедрения ИС;

обеспечение экономических результатов внедрения ИС предполагает реализацию совокупности организационных изменений предприятия;

необходимым условием получения запланированного экономического результата внедрения ИС является принятие «солидарной» ответственности всеми сторонами проекта;

жизненный цикл реализации экономических результатов внедрения ИС превышает жизненный цикл проекта внедрения ИТ-решения.

## Формализованный подход управления организационной трансформацией на проектах внедрения КИС

В качестве основы для подхода FOrTraM предлагается использовать функцию качества (Quality function deployment – QFD) [7].

Осуществление метода FOrTraM состоит из выполнения следующих шагов.

1. Определение множества экономических результатов проекта $\vec{E} = (E_1, ..., E_m)$, где $m$ – количество экономических результатов проекта внедрения ИС.

2. Определение приоритетов экономических результатов проекта $\vec{W} = \{w_i\}^{\mathrm{T}}$.

Ранжирование экономических результатов и присвоение им коэффициентов относительной значимости $w_i \in [0;1], \quad i = 1, ..., m$ производится посредством метода анализа иерархий Т. Саати (AHP)

3. Идентификация *организационных изменений* $\vec{C} = (C_1, ..., C_n)$, где $n$ – количество организационных изменений.

4. Формирование *корреляционной матрицы* и определение коэффициента корреляции *организационных изменений* $\underset{n\times n}{\sum} = \{r_{hl}\}$, где $h = 1, ..., n, l = 1, ..., n$.

5. Формирование *матрицы отношений экономических результатов проекта* и *обеспечивающих организационных изменений* $\underset{m\times n}{\mathbf{R}} = \{R_{ij}\}$, элементы которой (коэффициенты отношения) $R'_{ij} \in [0;1]$ определяются при помощи метода SMARTS и характеризуют вклад *j*-го организационного изменения в обеспечение реализации *i*-го экономического результата. Для учета корреляции организационных изменений вводится нормализованный коэффициент $R'_{ij} \in [0;1]$:

$$R'_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} R_{ik} r_{kj}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} R_{ik} r_{kj}}. \qquad (1)$$

Таким образом, матрица отношений нормализованных коэффициентов имеет вид $\underset{m\times n}{\mathbf{R}'} = \{R_{ij}'\}$.

6. Определение коэффициентов *воздействия организационных изменений*[1], $\vec{AI} = \{AI_j\}$.

Вектор $\vec{AI}$ характеризует воздействие *j*-го сопровождающего внедрение ИС организационного изменения на достижение всей совокупности запланированных экономических результатов проекта, нормализованных на их значимость. Значения элементов вектора $\vec{AI}$ есть линейная свертка:

$$AI_j = \sum_{i=1}^{m} w_i R'_{ij}, \qquad (2)$$

где *m* – общее количество релевантных проекту и введенных на шаге 1 экономических результатов внедрения ИС предприятия.

7. Определение множества *методов организационной трансформации*, релевантных идентифицированным организационным изменениям, $\vec{M} = (M_1, ..., M_p)$, где *p* – количество методов организационной трансформации.

Каждый метод характеризуется финансовыми $(s_k)$, и временными $(t_k)$ ресурсами, необходимыми для его осуществления: $M_k = \langle s_k, t_k \rangle$, где $k = 1, ..., p$.

8. Формирование *корреляционной матрицы* и определение коэффициента корреляции *методов организационной трансформации*, $\underset{p\times p}{\sum} = \{v_{fg}\}$, где $f = 1, ..., p, g = 1, ..., p$. Коэффициент $v_{fg} \in [-1;1]$ характеризует степень взаимоотношения между *f*-м и *g*-м методом организационной трансформации.

9. Формирование *матрицы отношений организационных изменений и методов организационной трансформации* $\underset{n\times p}{\mathbf{V}} = \{V_{jk}\}$, элементы которой – коэффициенты отношения – $V_{jk} \in [0;1]$ определяются при помощи процесса перевода лингвистических переменных вида «полностью соответствует», «соответствует», «почти не соответствует» и «не соответствует» – нечеткие числовые значения: (0,8; 0,9; 1), (0,2; 0,3; 0,4), (0; 0,1; 0,2), (0; 0; 0). В статье рассматривается вариант: «полностью соответствует» (0,8; 0,9; 1). Функция принадлежности имеет вид:

$$\mu_{\tilde{s}}(V_{jk}) = \begin{cases} 10(V_{jk} - 0,8), 0,8 \le V_{jk} \le 0,9 \\ 10(1 - V_{jk}), 0,9 \le V_{jk} \le 1 \end{cases}, \qquad (3)$$
$$j = 1, ..., n; k = 1, ..., p,$$

а нормализованный коэффициент отношения равен:

$$V'_{jk} = \frac{\sum_{l=1}^{p} V_{jl} v_{lk}}{\sum_{h=1}^{p}\sum_{l=1}^{p} V_{jl} v_{lh}}. \qquad (4)$$

Матрица отношений нормализованных коэффициентов $\underset{n\times p}{\mathbf{V}'} = \{V_{jk}'\}$.

10. Определение коэффициентов *эффективности методов организационной трансформации информационной системы* $\vec{AE} = \{AE_k\}$, $k = 1, ..., p$, где *p* – мощность множества релевантных методов организационной трансформации.

Вектор $\vec{AE}$ характеризует эффективность *k*-го метода организационной трансформации в части поддержки реализации необходимых организационных изменений, нормализованных на соответствующее значение вектора воздействия $\vec{AI}$:

$$AE_k = \sum_{j=1}^{n} AI_j V'_{jk}, \qquad (5)$$

где *n* – общее количество идентифицированных организационных изменений, обеспечивающих достижение запланированных экономических результатов внедрения ИС предприятия.

11. Построение *модели линейного программирования* для определения *рационального множества методов организационной трансформации* ИС предприятия $\vec{M}^* = \{M_{k^*}\}$, где $k^* = 1, ..., q$, $q \le p$, $q$ – количество элементов рационального

[1] *Absolute impact* – абсолютное воздействие (англ.).

множества методов организационной трансформации.

В условиях имеющихся ограничений финансовых и временных ресурсов на реализацию методов организационной трансформации ИС предприятия формулируется задача линейного целочисленного программирования следующего вида:

$$\max_{x_k} f(x_k) = \sum_{k=1}^{p} AE_k x_k, \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^{p} s_k x_k \le S, \\ \sum_{k=1}^{p} t_k x_k \le T \end{cases}, \qquad (6)$$

где $x_k = \{0,1\}$ – отражает решение по $k$-му методу организационной трансформации (нуль – отказ от использования $k$-го метода, единица – решение о применении $k$-го метода); $S$ – совокупный объем финансовых ресурсов; $T$ – совокупный объем временных ресурсов.

Предложенный подход позволяет реализовать выбор рационального перечня методов управления организационной трансформации ИС предприятия и обеспечить достижение запланированных экономических результатов. В дальнейшем предполагается проведение анализа чувствительности для определения предельного эффекта от реализации каждого из методов по управлению организационными изменениями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бэккер, Й.** Менеджмент процессов [Текст] / Й. Бэккер, Л. Вилков, В. Таратухин [и др.]. –М.: Эксмо, 2007.

2. **Ashurts, C.** Improving the impact of IT development projects: the benefits realization capability model [Text] / C. Ashurts, N.L. Doherty, J. Peppard // European J. of Information Systems. –2008. –№ 7.

3. **Markus, M.L.** Technochange management: using IT to drive organizational change [Text] / M.L. Markus // J.of Information Technology. –2004. –№ 19.

4. **Tiernan, C.** Information Technology: of Value or a Vulture? [Text] /C. Tiernan, J. Peppard // European Management J. –2004. –№ 6 (22).

5. **Edwards, W.** SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement, Organizational Behavior and Human Decision Processes 60 [Электронный ресурс] / W. Edwards, F.H. Barron. –1994.

6. **Galoppin, L.** Managing Organizational Change during SAP Implementation [Text] /L. Galoppin,S. Caems. –SAP Press, Bonn, Germany, 2007.

7. **Hauser, J.R.** The House of Quality [Text] / J.R. Hauser, D. Closing // Harvard Business Review. –May-June 1988.

8. **Saaty, T.L.** Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary [Text] / T.L. Saaty // European J. of Operational Research. –2003. –Vol. 145.

9. **Li-Feng, Mu.** A Fuzzy Multi-Objective Model of QFD Product Planning Integrating Kano Model [Text] / Mu Li-Feng, Tang Jia-Fu, Chen Yi-Zeng // International J. of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. –2008. –№ 6 (16).

# Робототехника и мехатроника

Представляем статьи, посвященные разработкам Государственного научного центра Российской Федерации Центрального научно-исследовательского института робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК). Все статьи, публикуемые в данном разделе, освещают различные направления деятельности Института, имеющие большой практический интерес.

ЦНИИ РТК ежегодно проводит конференцию «Экстремальная робототехника». Большинство предлагаемых вашему вниманию статей написано по материалам докладов участников конференции 2012 года. Среди них статьи о развитии космической и подводной робототехники, а также о более традиционной, мобильной наземной робототехнике.

Следует отметить статьи, посвященные перспективным направлениям работы Института: дальнейшему развитию модульного принципа построения роботов и их групповому управлению.

С новыми направлениями работ ЦНИИ РТК знакомят статьи о медицинской робототехнике и мехатронике с описанием первых образцов соответствующих изделий, отрабатываемых в медицинских учреждениях.

Директор-главный конструктор ЦНИИ РТК
А.В. Лопота

УДК 004.896-02

*А.В. Лопота, Е.И. Юревич*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПОСТРОЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*A.V. Lopota, E.I. Yurevich*
*St.-Petersburg, Russia*

# STAGES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ROBOTIC SYSTEMS DESIGN MODULAR PRINCIPLE

Рассмотрены четыре этапа развития модульного принципа построения робототехнических систем, которые предопределили дальнейшее развитие робототехники.

МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. РЕКОНФИГУРАЦИЯ. САМООРГАНИЗАЦИЯ.

In article four stages of development of a modular principle of creation of robotics systems which predetermined further development of a robotics are considered.

MODULAR PRINCIPLE. EXTREME ROBOTICS. RECONFIGURATION. SELF-ORGANIZING.

Модульный принцип построения и проектирования средств робототехники, разработанный еще на этапе становления промышленной робототехники, в дальнейшем стал основой последующего развития робототехники в целом вплоть до разумных роботов будущего. Этот принцип был предложен и впервые реализован в СССР в рамках первых государственных пятилетних программ по робототехнике в 80-х гг. прошлого столетия головной организацией по этим программам ЦНИИ РТК.

Создание и серийное производство унифицированных компонентов роботов – модулей позволило в кратчайшие сроки решить проблему обеспечения всех отраслей и ведомств страны быстро расширяющейся номенклатурой робототехнических систем и дальнейшего развития.

Были разработаны и освоены в производстве системы электромеханических модулей ПРЭМ, модулей управления ЕСМ и модульная система программного обеспечения СПОР. Одновременно была создана аналогичная система модулей пневматических промышленных роботов.

Эти роботы по своим характеристикам не уступали лучшим зарубежным образцам и непрерывно улучшались за счет совершенствования соответствующими головными организациями порученных им модулей [1]. В результате наша страна далеко обогнала по парку роботов все страны Европы и США, не успев до распада СССР обойти только Японию. Надо при этом отметить, что наша роботизация принципиально отличалась от того, как она развивалась в остальном мире. В СССР она имела четкую социальную ориентацию на высвобождение рабочих от неквалифицированных, а также опасных и вредных работ. В других странах с рыночной экономикой основным направлением применения роботов стала экономически обоснованная замена наиболее квалифицированных и высокооплачиваемых рабочих. Поэтому и номенклатура отечественных роботов была на порядок шире, чем, например, в Японии. С развалом СССР, а затем и всей промышленности пропало и отечественное роботостроение.

Второй этап развития модульной робототехники начался уже в 90-е гг. также в нашей стране после аварии на Чернобыльской АЭС. Именно благодаря наличию хорошо отработанных модулей ЦНИИ РТК при помощи около 40 ведущих предприятий города смог за два с небольшим месяца разработать, изготовить и ввести в эксплуатацию на станции 15 мобильных роботов различ-

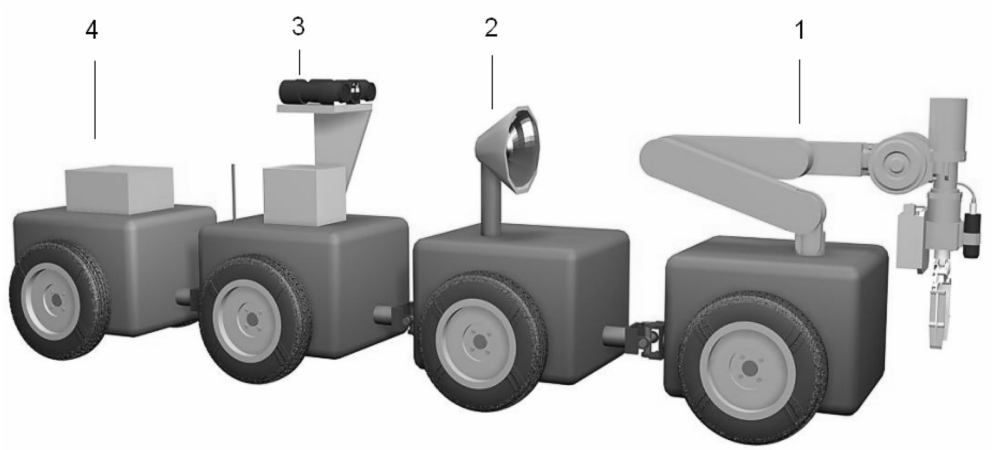



Рис. 1. Модульный мобильный робот «Робопоезд» (ЦНИИ РТК, Россия):
1, 2, 3, 4 – модули манипуляционный, сенсорики, связи, энергопитания

ного назначения, которые выполнили большой объем работ по обследованию радиационной обстановки и очистке здания и территории станции от радиационного мусора.

Это стало очередным подтверждением эффективности модульного принципа построения средств робототехники. Однако при этом выявилось новое важное качество данного принципа: возможность оперативного изменения состава роботов в соответствии с текущими задачами или изменениями внешних условий.

В ходе работ на ЧАЭС появилось новое направление в робототехнике – экстремальная робототехника, которая инициировала следующий этап развития модульного принципа в робототехнике – реконфигурируемых модульных роботов, т. е. роботов переменной структуры [1]. Именно в экстремальных ситуациях различных катастроф, аварий и активных противодействий имеет место предельная априорная неопределенность как условий предстоящих работ, так и самого их перечня. Что делает особо актуальной возможность компоновать состав роботов непосредственно на месте работы и корректировать его в ходе самих работ. Именно модульное построение позволяет это делать (правда, в данном случае речь идет о применении модулей, унифицированных не в государственном масштабе, с чего начиналось применение этого принципа, а в рамках только отдельных отраслей).

На рис. 1 приведен пример построения наземного реконфигурируемого робота на базе типоразмерного ряда транспортных модулей, позволяющего реализовывать практически неограниченную номенклатуру наземных мобильных роботов.

Такой робот может иметь любое количество транспортных двухколесных модулей с различными сочленениями. Колеса могут охватываться гусеницами или заменяться педипуляторами (ногами) из шарнирных модулей, из которых собираются манипуляторы. Транспортные модули могут комплектоваться различными функциональными модулями. На рисунке показана одна из таких возможных компоновок.

Первоочередные области применения реконфигурируемых робототехнических систем – МЧС и космонавтика, особенно системы, удаленные от центра управления. Например, это будет актуально при освоении Луны, Марса. Возможно и для долговременных космических станций типа МКС наряду со специальными манипуляторами постоянного применения для остальных многочисленных операций вместо поставки различных специальных роботов конкретного назначения выгоднее иметь 2-3 базовых робота разной размерности, дополняемых по мере необходимости новыми функциональными модулями для расширения их возможностей.

Не менее актуален такой подход, например, в атомной энергетике, как это впервые и было реализовано на ЧАЭС. Очередной раз это показали и аварии на японских АЭС. Оказалось, что в Японии, которая считается мировым лидером в робототехнике, нет роботов, пригодных для ликвидации последствий подобных аварий. Япония даже закупила роботы в Германии и Италии. Неизвестно только, насколько они помогли. Другое

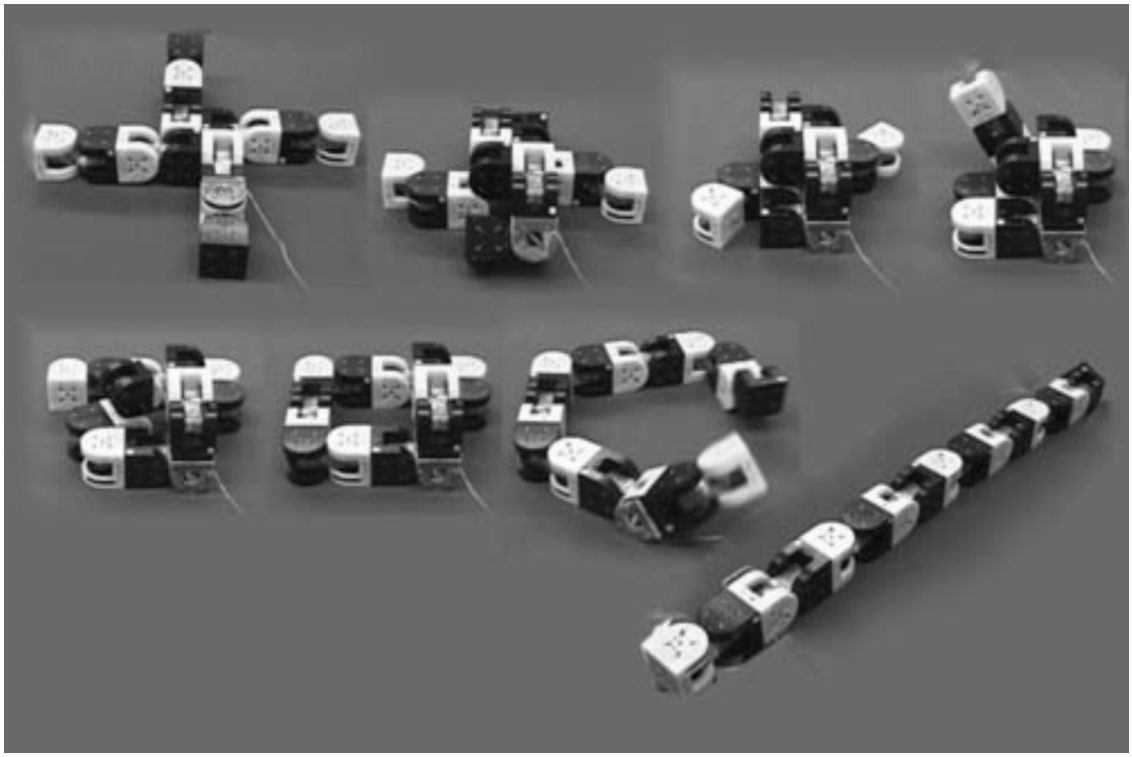


Рис. 2. Варианты компоновок робототехнической системы M-TRAN III (Япония)

дело, если бы Япония располагала реконфигурируемыми роботами, которые можно оптимально структурировать в соответствии с конкретной ситуацией.

Этап развития реконфигурируемых робототехнических систем находится еще в начальной стадии, но он определяет одно из перспективных направлений научно-технического развития современной робототехники. В частности, разработанная ЦНИИ РТК концепция развития космической робототехники в качестве нового перспективного принципа построения таких робототехнических систем предусматривает именно реконфигурируемость.

В настоящее время робототехнические системы переменной структуры наиболее интенсивно исследуются и развиваются в мини- и микроробототехнике. Там возник новый тип модулей – многофункциональные модули. По своим функциональным возможностям они соответствуют полноценному мобильному роботу, но предназначены для совместного применения в единой конструкции типа цепочки, двух- или трехмерных конструкций. Одним из первоочередных применений таких систем стали транспортные операции со структурной адаптацией к меняющимся условиям внешней среды с использованием различных способов передвижения. Затем последовали исследования манипуляционных возможностей таких систем.

Созданы и нашли практические применение первые реконфигурируемые миниробототехнические системы для различных силовых структур, для медицины и т. д. На рис. 2 приведен пример компоновок робототехнической системы, собираемой из подвижных многофункциональных модулей с управлением от микропроцессоров, которые при соединении таких модулей в единую структуру объединяются в локальную сеть.

Следующим, третьим очевидным этапом дальнейшего развития модульных реконфигурируемых систем являются самоорганизующиеся робототехнические системы. Конечно, такие системы также окажутся особенно востребованными для удаленных робототехнических систем, в т. ч. космических. Очень быстро эта идея вышла за рамки робототехники, образовав новое научно-техническое направление самоорганизующихся технических систем самого широкого назначения. Наиболее интенсивно исследования в этой новой области, по-прежнему, ведутся в рамках миниробототехники, и она остается основной

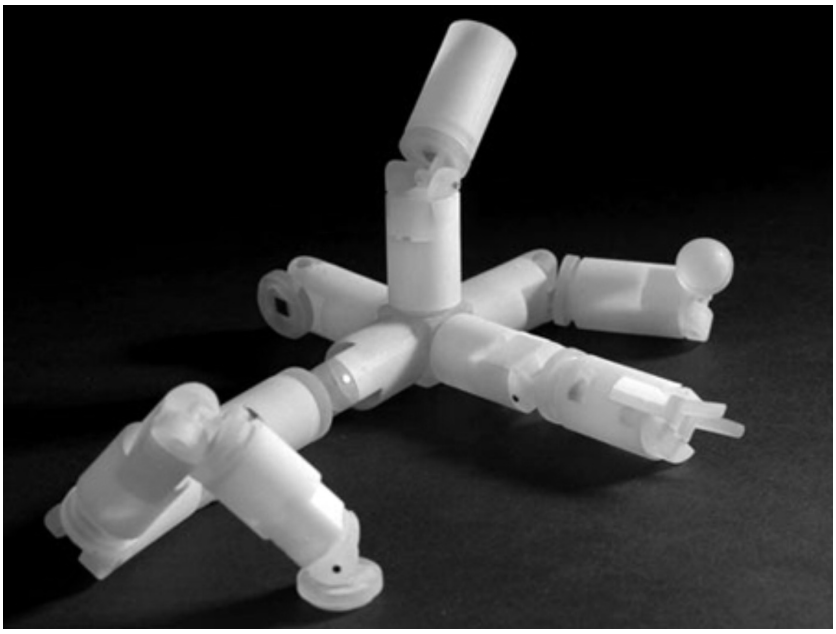


Рис. 3. Самособирающийся хирургический робот ARES (Италия)

экспериментальной базой нового направления.

Речь идет о разработке теории и методов проектирования принципиально нового типа технических систем, способных самостоятельно собираться из элементарных стандартных «кирпичиков» – модулей, подобно тому, как живые организмы формируются из клеток. Затем такие системы могут перестраиваться в другие изделия.

Развиваются и прикладные разработки подобных систем, например, для медицины, для исследования космических объектов. Для этих систем предложены и новые термины: «программируемая материя», «синтетическая реальность» и т. п. [2].

На рис. 3 показан один из первых примеров практического применения такого типа роботов: медицинский робот для проведения операций без разреза кожных покровов. Пациент проглатывает отдельные модули робота. Затем они собираются внутри организма в робота-хирурга, с помощью которого в режиме дистанционного управления выполняются операции. Эти модули содержат разные сенсорные системы, включая видеокамеру, связь, микропроцессоры, источники энергопитания и специальные хирургические инструменты.

Сформировались два типа реконфигурируемых структур: гомогенные, из одинаковых модулей, и гетерогенные, в которых используются функционально различные модули. Из приведенных выше примеров к гомогенным относится система M-TRAN III, а к гетерогенным – система ARES.

Гомогенные структуры наиболее удобны для формирования одно-, двух- и трехмерных структур, для быстрого перехода от одной структуры к другой и для выполнения операций саморемонта. Они наиболее близки клеточному строению живых структур. Модули гетерогенных систем специализированы и поэтому в совокупности обеспечивают существенно большие функциональные возможности всей системе, особенно в отношении уровня управления и адаптивности. Поэтому в настоящее время развитие идет в основном в направлении гетерогенных структур.

Наконец, последний, еще предстоящий, четвертый этап развития модульных роботов – это роботы, самосовершенствующиеся на основе самоорганизации в ходе самообучения.

В рамках робототехники идея самоорганизации с целью самосовершенствования имеет особое стратегическое значение как способ создания роботов следующего поколения после интеллектуальных роботов – по настоящему разумных роботов, сочетающих интеллект с креативностью (творческими неформализуемыми способностями), т. е. сочетающих вербальный и образный способы принятия решений подобно мышлению человека. По существу, речь идет о моделировании работы новой коры головного мозга. Мозг

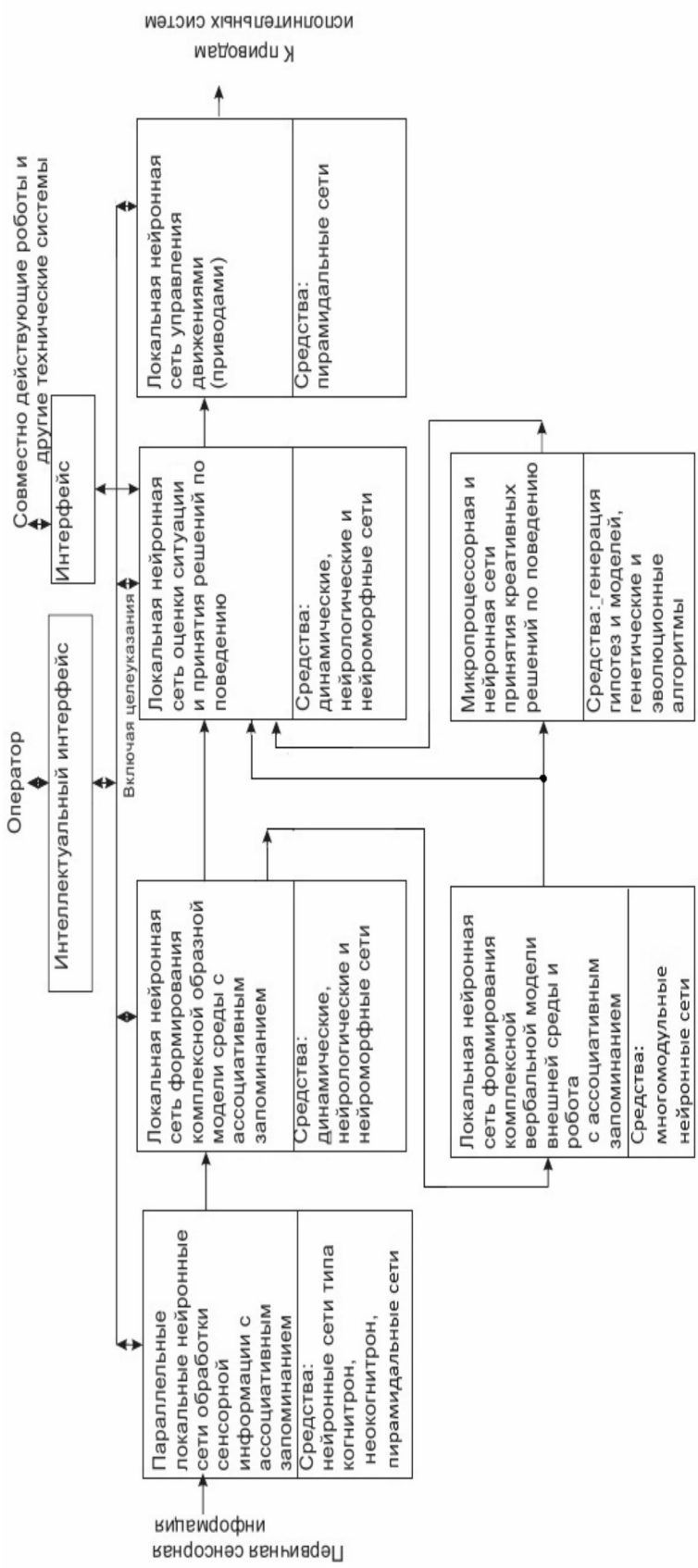



Рис. 4. Система управления разумного робота

является большой системой, знание структуры которой совершенно недостаточно для того, чтобы раскрыть качественный эмергентный эффект зарождения и развития мышления и тем более воспроизвести его технически. Одним из способов решения последней проблемы может быть использование самоорганизующихся роботов, снабженных алгоритмом самоусовершенствования. Иными словами, на базе таких роботов представляется возможным смоделировать процесс эволюционного развития разума человека, пределом которого, очевидно, не будет и сам этот разум. Обоснованием этого является сама идея робота как аналога человека. Робот является уникальной технической системой, которая имеет двустороннее информационное и силовое взаимодействие с внешней средой и на этой основе как все живые организмы способен вступить в процесс эволюционного совершенствования, если в него будут вложены соответствующие стимулы и мотивация. На рис. 4 приведена система управления такого разумного робота, которая может быть реализована на основе указанных на рисунке выполненных исследований и разработок отдельных ее функциональных компонентов [3].

И, конечно, завершением этого этапа создания искусственного разума будет распределенный коллективный разум групп совместно функционирующих роботов, что тоже найдет свои важные области применения.

По сравнению с роботами предыдущего, третьего этапа развития модульного принципа, здесь основное значение переходит от совершенствования материальной структуры к эволюционному развитию модульного алгоритмического и программного обеспечения.

Итак, разработанный для решения важной общегосударственной задачи обеспечения растущей номенклатуры промышленных роботов модульный принцип построения средств робототехники в своем развитии стал одним из определяющих системных принципов дальнейшего развития современной робототехники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юревич, Е.И.** Роботы ЦНИИ РТК на Чернобыльской АЭС и развитие экстремальной робототехники [Текст]/ Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2004.

2. **Иванов, А.В.** Мини- и микроробототехника [Текст]/ А.В.Иванов, Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.

3. **Станкевич, Л.А.** Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике [Текст] / Л.А. Станкевич, Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012.

УДК 62-519

*С.А. Половко, П.К. Шубин, В.И. Юдин*
*Санкт-Петербург, Россия*

# КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РОБОТИЗАЦИИ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

*S.A. Polovko, P.K. Shubin, V.I. Yudin*
*St.-Petersburg, Russia*

# A CONCEPTUAL ISSUES ROBOTIZATION MARINE ENGINEERING

Рассмотрены научно обоснованные концепции настоятельной необходимости роботизации всех работ, связанных с морской техникой, призванной вывести человека из зоны повышенного риска, повысить функциональные возможности, оперативность и производительность морской техники, а также разрешить стратегический конфликт между усложнением и интенсификацией процессов управления и обслуживания техники и ограниченными возможностями человека.

МОРСКАЯ ТЕХНИКА. РОБОТЫ. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ. РОБОТИЗАЦИЯ. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПРОГРАММА.

The article describes the concept of evidence-based robotics urgent need of all work related to marine technology, designed to bring people from high-risk areas, to improve the functionality, flexibility and performance marine applications and enable strategic conflict between complexity and intensification of management and maintenance of equipment and disabled person.

MARINE ENGINEERING. ROBOT. ROBOT SYSTEMS. ROBOTIZATION. STATE PROGRAM.

В качестве принципиальных, концептуальных вопросов научно обоснованной роботизации морской техники (МТ) целесообразно рассмотреть прежде всего вопросы, непосредственно вытекающие из причин необходимости роботизации. То есть причин, по которым объекты МТ становятся объектами внедрения роботов, робототехнических комплексов (РТК) и систем. Здесь и в дальнейшем под РТК понимается совокупность робота и пульта управления им, а под робототехнической системой – совокупность РТК и объекта его носителя.

Роботы, как свидетельствует опыт их создания и применения, внедряются в первую очередь там, где труд человека и его жизнедеятельность затруднены, невозможны или сопряжены с угрозой для жизни и здоровья. Например, это имеет место в зонах радиоактивного или химического загрязнения, в условиях боевых действий, при проведении подводных или космических исследований, работ и т. п.

Применительно к морской деятельности это прежде всего:

глубоководные исследования;

водолазные работы на больших глубинах;

подводно-технические работы;

аварийно-спасательные работы;

поисково-спасательные работы в неблагоприятных гидрометеоусловиях (ГМУ);

добыча сырья и полезных ископаемых на шельфе.

Применительно к военной области:

противоминная и противодиверсионная оборона;

разведка, поиск и слежение;

участие в боевых действиях и их обеспечение.

Таким образом, практически весь спектр объектов: от подводной МТ (водолазная техника, обитаемые подводные аппараты – ОПА, подводные лодки – ПЛПЛ, техника освоения шельфовой зоны мирового океана), надводной (корабли, суда, катера) до воздушной МТ (летательные аппараты – ЛА) являются объектами роботизации, т. е. представляют собой объекты, подлежащие внедрению на них роботов, РТК и систем.

Причем с той или иной степенью риска для жизни человека сопряжена не только работа вне

объекта МТ, за бортом, на глубине (водолазный труд), но и работа непосредственно на морском объекте [1]. Очевидно, что очередность роботизации должна быть напрямую связана с величиной риска для жизни персонала (членов экипажа). Количественно величина риска может быть измерена статистической или прогнозной (расчетной) вероятностью смерти человека в зависимости от вида деятельности в год [год$^{-1}$], как это показано в [2] на основе статистических данных и данных литературных источников.

Примем к рассмотрению три уровня риска, представленные на рисунке, в зависимости от вида деятельности и источника риска по данным [3]. Чем выше величина риска, тем ближе данный вид деятельности человека (и соответствующий ему вид техники) к началу очереди на роботизацию. Имеется в виду первоочередное создание роботизированных зон как вне, так и внутри объектов МТ, зон функционирования роботов, с целью удалить человека из зоны повышенного риска.

Пусть $n_i$ – порядковый номер в очереди на роботизацию данного ($i$-го) объекта МТ, а $r_i$ – соответственно, вероятность гибели членов экипажа $i$-го объекта МТ в год. Тогда для оценки очередности роботизации можем получить:

$$n_i = 1 + ή(r_i);\ i(1, I), \qquad (1)$$

где $ή(r_i)$ – ступенчатая функция от величины риска:

$ή(r_i) = 0$, при $r_i \geq r_{НУР} = 10^{-3}$ год$^{-1}$;
$ή(r_i) = 1$, при $r_{НУР} > r_i \geq r_{ПДУ} = 10^{-4}$ год$^{-1}$;
$ή(r_i) = 2$, при $r_{ПДУ} > r_i \geq r_{ППУ} = 10^{-6}$ год$^{-1}$;
$ή(r_i) = 3$, $r_i < r_{ППУ}$.

Оценивая требуемую степень роботизации $i$-го объекта МТ ($S_i^m$), необходимо ориентироваться прежде всего на степень сокращения численности персонала в зоне деятельности с повышенным риском, которая полагается пропорциональной степени превышения $r_i$ над $r_{ПДУ}$ в следующем виде:

$$S_i^m = 1 - r_{ПДУ}\, r_i^{-1}. \qquad (2)$$

Оценка доли персонала от общей исходной численности его ($N_i$) на $i$-м объекте морской техники, остающейся после внедрения РТК, будет иметь следующий вид:

$$N_i^{роб} = [(1 - S_i)N_i]. \qquad (3)$$

Степень роботизации, т. е. степень внедрения РТК с целью замены персонала $i$-го объекта МТ, можно оценивать в процентном отношении в следующем виде:

$$S_i = (N_i - N_i^{роб})N_i^{-1} \cdot 100\ \%. \qquad (4)$$

Из (2) очевидно следует, что при $r_i \geq r_{НУР} \rightarrow S_i^m \geq 90{,}0$ %. То есть практически весь персонал должен быть удален с данного объекта (из данной зоны) и заменен РТК.

Принцип замены человеческого труда на роботизированный в зонах повышенной опасности является безусловно главенствующим, что подтверждается активным внедрением подводных роботов – необитаемых подводных аппаратов (НПА). Однако он не исчерпывает всех потребностей во внедрении РТК в морское дело.

Следующими по степени значимости необходимо признать принципы расширения функциональных возможностей морской техники, роста оперативности и производительности работ за счет внедрения морских роботов (МР), РТК и систем. Так, при замене тяжелого водолазного труда, например, в случае осмотра, обследования или ремонта объектов под водой (на грунте) подводным роботом, расширяются функциональные возможности, растет оперативность и производительность работ [4]. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в качестве спутников ПЛ существенно расширяет боевые возможности и повышает боевую устойчивость ПЛ [5]. Активная разработка и применение безэкипажных катеров (БК) и судов (БС), а также беспилотных ЛА (БПЛА) за рубежом, также свидетельствует о перспективности роботизированной МТ. Действительно, даже при прочих равных условиях исключается риск потери экипажа объекта МТ при работе в сложных ГМУ. В целом можно говорить о сравнительно высокой эффективности (полезности) морских роботов (НПА, БК, БС, БПЛА) при сравнительно невысокой стоимости [6].

Следующим концептуальным вопросом в проблеме научно обоснованной роботизации объектов МТ является классификация морской робототехники, которая не только фиксирует существующее состояние дел и опыт разработки и применения роботов, но также позволяет прогнозировать основные тенденции и перспективные направления дальнейшего развития при решении задач внешней роботизации.

Наиболее обоснованный подход к классификации морской подводной робототехники

представлен в [6]. Под морской робототехникой будем понимать собственно роботов, робототехнические комплексы и системы. Разнообразие созданных в мире НПА затрудняет их строгую классификацию. Чаще всего в качестве классификационных признаков *морских РТК* (*НПА*) используют массу, габариты, автономность, способ передвижения, наличие плавучести, рабочую глубину, схему развертывания, назначение, функциональные и конструктивные особенности, стоимость и некоторые др.

• Классификация по массогабаритным характеристикам:

микроПА (ПМА), масса (сухая) < 20 кг, дальность плавания менее 1–2 морских миль, оперативная (рабочая) глубина до 150 м;

мини-ПА, масса 20–100 кг, дальность плавания от 0,5 до 4000 морских миль, оперативная глубина до 2000 м;

малые НПА, масса 100–500 кг. В настоящее время ПА этого класса составляют 15–20 % и находят широкое применение при решении различных задач на глубинах до 1500 м;

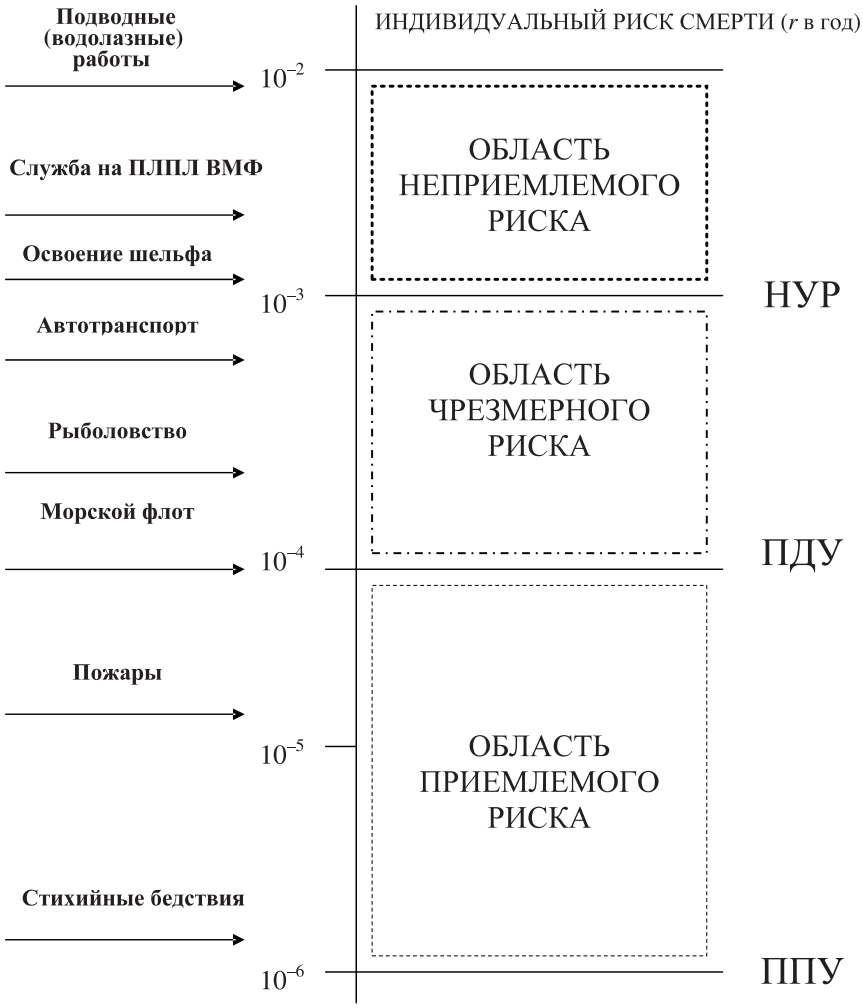
средние НПА, масса более 500 кг, но менее 2000 кг;

большие НПА, масса > 2000 кг.

• Классификация по особенностям формы несущей конструкции:

классической формы (цилиндрической, конической и сферической);

бионические (плавающего и ползающего типов);




Уровни риска смерти человека (вероятность – *r* в год) в зависимости от вида деятельности и источника риска, а также принятая классификация уровней риска:
ППУ – предельно пренебрежимый уровень риска; ПДУ – предельно допустимый уровень риска;
НУР – неприемлемый уровень риска

планерной (самолетной) формы;

с солнечной панелью на верхней части корпуса (плоские формы);

ползающие НПА на гусеничной базе.

• Классификация морских РТК (НПА) по степени автономности. АНПА должен отвечать трем основным условиям автономности: механической, энергетической и информационной.

Механическая автономность предполагает отсутствие какой-либо механической связи в виде кабеля, троса или шланга, связывающих ПА с судном-носителем либо с донной станцией или береговой базой.

Энергетическая автономность предполагает наличие на борту ПА источника питания в виде, например, аккумуляторных батарей, топливных элементов, ядерного реактора, двигателя внутреннего сгорания с замкнутым рабочим циклом и т. п.

Информационная автономность НПА предполагает отсутствие информационного обмена между аппаратом и судном-носителем, либо донной станцией или береговой базой. При этом НПА должен иметь и автономную инерциальную навигационную систему.

• Классификация морских РТК (НПА) по информационному принципу для соответствующего поколения НПА.

Морские автономные РТК ВН (АНПА) первого поколения функционируют по заранее заданной жесткой неизменяемой программе.

Дистанционно управляемые (ДУ) НПА первого поколения управляются по разомкнутому контуру. В этих простейших устройствах команды управления подаются непосредственно в движительный комплекс без использования автоматических обратных связей.

АНПА второго поколения имеют разветвленную сенсорную систему.

Второе поколение ДУНПА предполагает наличие автоматических обратных связей по координатам состояния объекта управления: высоте над дном, глубине погружения, скорости, угловым координатам и т. п. Эти очередные координаты сравниваются в автопилоте с заданными, определяемыми оператором.

АНПА третьего поколения будут обладать элементами искусственного интеллекта: возможностью самостоятельного принятия несложных решений в рамках общей поставленной перед ними задачи; элементами искусственного зрения с возможностью автоматического распознавания простых образов; возможностью к элементарному самообучению с пополнением собственной базы знаний.

ДУНПА третьего поколения управляются оператором в интерактивном режиме. Система супервизорного управления предполагает уже некую иерархию, состоящую из верхнего уровня, реализуемого в ЭВМ судна-носителя, и нижнего уровня, реализуемого на борту подводного модуля.

• В зависимости от глубины погружения обычно рассматривают: мелководные ПТПА с рабочей глубиной погружения до 100 м, ПТПА для работ на шельфе (300–600 м), аппараты средних глубин (до 2000 м) и ПТПА больших и предельных глубин (6000 м и более).

• В зависимости от типа движительной установки можно различать НПА с традиционной винторулевой группой, МР с движительной установкой на бионических принципах и АНПА – планеры с движительной системой, использующей изменение дифферента и плавучести.

Современные робототехнические системы находят применение практически во всех областях подводно-технических работ. Однако главной областью их применения была и остается военная [8]. Уже произошло включение в состав ВМС ведущих индустриальных государств боевых НПА, БПЛА, которые могут стать высокоэффективным и скрытым компонентом системы средств вооруженной борьбы на океанских и морских театрах военных действий. Вследствие относительно невысокой стоимости производство НПА может быть крупносерийным, а их применение – широкомасштабным.

В плане создания НПА, БПЛА и БС военного назначения особенно показательны усилия США. Например, АНПА придаются каждой многоцелевой и ракетной ПЛ. Каждой тактической группе надводных кораблей придаются два таких АНПА. Развертывание АНПА с ПЛ предполагается проводить через торпедные аппараты, пусковые ракетные шахты или со специально оборудованных для них мест снаружи прочного корпуса ПЛ [7]. Чрезвычайно перспективным оказалось использование НПА и БПЛА в борьбе с минной опасностью. Их применение привело к созданию новой концепции «охоты на мины», включающей обнаружение, классификацию, идентификацию и нейтрализацию (уничтожение) мин. Противомин-

ные НПА, дистанционно управляемые с корабля, позволяют выполнять противоминные операции с большей эффективностью, а также увеличить глубины районов противоминных действий, сократить время на проведение идентификации и уничтожения [7]. В планах Пентагона главный упор в будущих сетецентрических войнах делается на широкомасштабное использование боевых роботов, непилотируемых летательных аппаратов и необитаемых подводных аппаратов. Пентагон рассчитывает к 2020 г. роботизировать треть всех боевых средств, создавая полностью автономные роботизированные соединения и другие формирования [8].

Развитие отечественных морских робототехнических систем и комплексов специального назначения необходимо проводить в соответствии с Морской доктриной Российской Федерации на период до 2020 г. [9], с учетом результата анализа тенденций развития мировой робототехники, а также в связи с переходом экономики России на инновационный путь развития.

При этом учитываются результаты выполнения федеральной целевой программы «Мировой океан», проводимого на постоянной основе анализа состояния и тенденций развития морской деятельности в Российской Федерации и в мире в целом, а также системных исследований по вопросам, касающимся обеспечения национальной безопасности Российской Федерации в сфере изучения, освоения и использования Мирового океана. Эффективность внедрения полученных в ФЦП результатов определяется широким использованием технологий двойного применения и модульными принципами проектирования.

Цель развития морской робототехники – повышение эффективности использования специальных систем и вооружений ВМФ, специальных систем ведомств, эксплуатирующих морские ресурсы, расширение их функциональных возможностей, обеспечение безопасности деятельности экипажей ЛА, НК, ПЛ, подводных аппаратов и выполнения специальных, подводно-технических и аварийно-спасательных работ.

Достижение цели обеспечивается реализацией следующих принципов развития в части конструирования, создания и применения морской робототехники:

унификация и модульное построение;

миниатюризация и интеллектуализация;

сочетание автоматического, автоматизированного и группового управления;

информационная поддержка управления робототехническими системами;

гибридизация по комплексированию разнородных мехатронных модулей в составе комплексов и систем;

распределенная инфраструктура сопровождения в сочетании с бортовыми системами информационной поддержки морских операций.

Основные направления развития морской робототехники должны обеспечивать решение ряда стратегических проблем усложнения и интенсификации военной техники, связанных с взаимодействием в системе «человек-техника» [10].

Внутреннее направление, нацеленное на обеспечение роботизации энергонасыщенных герметичных отсеков НК, ПЛ и ОПА. К нему относятся внутриотсечные робототехнические средства (в т. ч. подвижные малогабаритные средства мониторинга), комплексы и системы предупреждения о наступлении опасных (аварийных) ситуаций и принятия мер по их устранению [2, 3].

Внешнее направление, в обеспечение роботизации водолазных и специальных морских работ, включая мониторинг состояния потенциально опасных объектов, а также аварийно-спасательные работы. К нему относятся БПЛА, БПС, МРС, АНПА, беспилотные обитаемые подводные аппараты (БОПА), морские робототехнические комплексы и системы [4, 5].

Основными задачами развития морской робототехники являются функциональные, технологические, сервисные и организационные.

Перспективные функциональные задачи морской робототехники в рамках внутрикорабельной деятельности:

ведение мониторинга состояния механизмов и систем, параметров внутриотсечной среды;

проведение отдельных опасных и особо опасных работ внутри и снаружи отсеков и помещений;

технологические и транспортные операции;

обеспечение выполнения функций экипажа в период беспилотного функционирования НК, ПЛ или ЛА;

предупреждение о наступлении аварийных ситуаций и принятие мер по их устранению.

Перспективные функциональные задачи морской робототехники в рамках функционирования на поверхности объекта, над водой, под водой и на дне:

мониторинг и техническое обслуживание НК, ПЛ и ОПА (включая сбор и передачу информации о состоянии ОПА);

выполнение технологических операций и обеспечение научных исследований;

выполнение задач разведки, наблюдения, ведения определенных боевых действий самостоятельно;

разминирование, работы с потенциально опасными объектами;

работы в составе навигационных систем и систем гидрологического и экологического мониторинга.

Основные перспективные технологические задачи в области создания морской робототехники:

создание гибридных модульных автономных МРС с оперативной модификацией собственной структуры для различных функциональных назначений;

разработка способов группового управления роботами и организация их взаимодействия;

создание систем телеуправления с объемной визуализацией, в т. ч. в масштабе реального времени;

управление МРС с использованием информационно-сетевых технологий, включая самодиагностику и самообучение;

интеграция МРС в системы более высокого уровня, включающие средства доставки в район их применения и всестороннее обеспечение функционирования;

организация человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего автоматическое, автоматизированное, супервизорное и групповое управление МР.

Основными сервисными задачами при эксплуатации морской робототехники являются:

развитие наземной и бортовой инфраструктуры для отработки поддержки и сопровождения МРС;

разработка ситуационных имитационно-моделирующих комплексов и тренажеров, специального оборудования и оснастки для обучения, обслуживания и поддержки МРС;

обеспечение ремонтопригодности и возможности утилизации конструкций оборудования, приборов и систем.

В составе основных организационных задач и мероприятий создания и внедрения морской робототехники целесообразно предусмотреть:

разработку комплексной целевой программы (КЦП) развития морской робототехники (роботизации МТ);

создание рабочего органа для обоснования и формирования КЦП роботизации МТ, включая планирование мероприятий, формирование перечня конкурсных заданий, экспертизу, отбор предлагаемых проектов и возможных решений;

проведение мероприятий по организационно-штатному, кадровому и материальному обеспечению испытаний и эксплуатации морской робототехники на флоте.

В качестве показателей и критериев эффективности разработки и внедрения морской робототехники целесообразно рассмотреть следующие основные:

1) степень замены персонала объекта;

2) военно-экономическую эффективность (критерий эффективности – стоимость);

3) степень универсальности (возможность двойного использования);

4) степень стандартизации и унификации (конструктивно-технологический критерий);

5) степень соответствия функциональному назначению (критерий технического совершенства, возможности дальнейшей модернизации, модификации, усовершенствования и интегрирования в другие системы).

Основным условием для разработки и внедрения РТК, систем и их элементов является успешное решение экономических и организационных задач, прежде всего задач разработки и реализации КЦП роботизации МТ и федеральных программ закупок РТК.

Одним из самых сложных и трудоемких процессов при разработке КЦП предполагается составление перечня работ и технологических карт их выполнения (каталогизация работ) для решения задач, в которых необходимо использование робототехнических средств. Каждая типовая операция, проводимая силами ВМФ и других заинтересованных ведомств, должна быть представлена в виде алгоритма, либо набора типовых действий или сценариев. Из полученного набора сценариев должны быть вычленены те, где необходимо использование робототехнических средств. Выбранные сценарии (отдельные операции) должны быть сведены в единый пополняемый реестр работ, предусматривающих использование робототехнических средств. Данный перечень должен иметь строгую иерархическую структуру, отра-

жающую степень важности (первоочередности) данных работ, информацию о частоте или повторяемости их проведения, оценки затрат на разработку и изготовление робототехнических средств для их проведения. Разработанный перечень должен стать исходной информацией для последующего принятия решения о разработке необходимых средств в рамках КЦП.

Концептуальное значение имеет уже известный тезис: многие важные задачи флота могут быть успешно решены, если ориентироваться на групповое использование взаимодействующих относительно недорогих, портативных, малогабаритных роботов, не требующих развитой инфраструктуры и высококвалифицированного обслуживающего персонала, вместо меньшего числа больших, дорогостоящих, требующих специальных носителей, и тем более обитаемых, подводных, надводных и летательных аппаратов.

Таким образом, роботизация морской техники призвана вывести человека из зоны повышенного риска, повысить функциональные возможности, оперативность и производительность морской техники а также разрешить стратегический конфликт между усложнением и интенсификацией процессов управления и обслуживания техники, и ограниченными возможностями человека.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, М.Н.** Безопасность человека на море [Текст] / М.Н. Александров. –Л.: Судостроение, 1983.

2. **Шубин, П.К.** Проблема внедрения безлюдных технологий на морские объекты [Текст] / П.К. Шубин // Экстремальная робототехника. Матер. XIII науч.-технич. конф. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003. –С. 139–149.

3. **Шубин, П.К.** Повышение безопасности энергонасыщенных объектов ВМФ средствами робототехники. Актуальные проблемы защиты и безопасности [Текст] / П.К. Шубин // Экстремальная робототехника. Тр. XIV Всерос. науч.-практич. конф. –СПб.: НПО Специальных материалов, 2011. –Т. 5. –С. 127–138.

4. **Агеев, М.Д.** Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.]; Под. ред. М.Д. Агеева. –М.: Наука, 2005. –398 с.

5. **Агеев, М.Д.** Необитаемые подводные аппараты военного назначения: Монография [Текст] / М.Д. Агеев, Л.А. Наумов, Г.Ю. Илларионов [и др.]; Под. ред. М.Д. Агеева. –Владивосток: Дальнаука, 2005. –168 с.

6. **Алексеев, Ю.К.** Состояние и перспективы развития подводной робототехники. Ч. 1 [Текст] / Ю.К. Алексеев, Е.В. Макаров, В.Ф. Филаретов // Мехатроника. –2002. –№ 2. –С. 16–26.

7. **Илларионов, Г.Ю.** Угроза из глубины: XXI век [Текст] / Г.Ю. Илларионов, К.С. Сиденко, Л.Ю. Бочаров. –Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. –304 с.

8. **Баулин, В.** Реализация концепции «Сетецентрическая война» в ВМС США [Текст] / В. Баулин, А. Кондратьев // Зарубежное военное обозрение. –2009. –№ 6. –С. 61–67.

9. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года (утв. Президентом РФ В.В. Путиным 27 июля 2001 г. № Пр-1387).

10. **Лопота, В.А.** О путях решения некоторых стратегических проблем военной техники [Текст] / В.А. Лопота, Е.И. Юревич // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. –М., 2003. –Вып. 9–10. –С. 7–9.

УДК 629.06

*А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.В. Лопота*
*Санкт-Петербург, Россия*

# СРЕДСТВА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*A.A. Gradovtsev, A.S. Kondratyev, A.V. Lopota*
*St.-Petersburg, Russia*

# ROBOTIC SYSTEMS FOR PROSPECTIVE SPACE INFRASTRUCTURE FUNCTIONS SUPPORT

Представлены результаты анализа документов, позволяющих сформулировать цели и задачи деятельности в области космической робототехники. Разработаны предложения по составу средств робототехнического обеспечения перспективной космической инфраструктуры. Предложен предварительный прогнозный сценарий создания отечественных средств космической робототехники на основе собственного опыта ЦНИИ РТК в данной области.

КОСМИЧЕСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. СРЕДСТВА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА. ПРОГНОЗ.

The article considers documents that help defining objectives and tasks of space robotics activities. Suggestions for a prospective set of robotic tools for future space infrastructure elements are elaborated. Basing on CNII RTC knowledge and experience, a preliminary prognostic scenario for Russian space robotic systems development is proposed.

SPACE ROBOTICS. ROBOTIC SYSTEMS. PROSPECTIVE SPACE INFRASTRUCTURE. PROGNOSIS.

Мировой опыт создания и применения робототехнических систем космического назначения (РТС КН) показывает, что они являются мощным инструментом в решении задач изучения космического пространства, создания космических аппаратов (КА) и их эксплуатации. Очевидно, что роль космической робототехники будет непрерывно возрастать в связи с необходимостью разработки и обслуживания глобальных систем связи, навигации и наблюдения, постоянно действующих пилотируемых и посещаемых орбитальных станций (ОС), а также баз на Луне и планетах Солнечной системы.

Современная космическая робототехника представляет собой перспективное научно-техническое направление, комплексно охватывающее проектирование, разработку, производство и эксплуатацию РТС КН. Такие системы сегодня активно разрабатываются и используются в международных космических проектах США, Канады, Японии, стран Европейского Союза и России. Современные РТС КН различаются по габаритам, строению, назначению, методам управления.

**Термины и определения.** Введем следующие определения:

*перспективная космическая инфраструктура* (ПКИ) – совокупность средств, функционирующих в космическом пространстве, наземной космической инфраструктуры и ракетно-космической промышленности [1];

*базовый элемент ПКИ* – пилотируемый космический комплекс или составная часть космической системы, выполняющая ряд последовательных функций, обеспечивающих доставку человека в требуемую область космического пространства, его безопасное пребывание (работу) в ней и доставку обратно на Землю (*базовых функций*) [1];

*средства робототехнического обеспечения* (СРТО) – РТС КН, обеспечивающие выполнение функций базовых элементов ПКИ.

**Ожидаемые результаты реализации Стратегии развития космической деятельности России.** Основополагающим документом стратегического планирования при организации и осуществлении российской космической деятельности, уточнении действующих и формировании новых федеральных целевых (государственных) программ является Стратегия развития космической деятельности России до 2030 г. и на даль-

нейшую перспективу [2]. В опубликованном проекте Стратегии описаны следующие рубежи ее реализации:

- 2015 г. – рубеж восстановления возможностей;
- 2020 г. – рубеж закрепления возможностей;
- 2030 г. – рубеж прорыва;
- после 2030 г. – развитие прорыва.

Выделим аспекты Стратегии, важные с точки зрения создания и развития СРТО в составе ПКИ.

Достижение *рубежа восстановления возможностей* определяется выполнением действующих на момент принятия Стратегии планов и программ по всем направлениям космической деятельности, в т. ч.:

развертывание необходимых составов орбитальных группировок КА;

создание научно-технического задела для исследования и освоения дальнего космоса.

Достижение *рубежа закрепления возможностей* определяется закреплением России в группе ведущих космических держав по всем основным направлениям космической деятельности, в т. ч.:

создание пилотируемого корабля нового поколения;

выполнение исследований космического пространства, проведение миссий по исследованию Луны;

участие в работах по развертыванию на Марсе сети исследовательских станций, проведению миссий к Венере, в систему Юпитера и к астероидам.

Достижение *рубежа прорыва* определяется постановкой и началом реализации масштабных проектов по использованию ближнего космоса, исследованию и освоению дальнего космоса, в т. ч.:

создание прогрессивных технологий обслуживания, заправки и ремонта КА в околоземном космосе;

разработка средств для контактных исследований и освоения Луны;

участие России в проектах, направленных на снижение засоренности в околоземном космическом пространстве.

*Развитие прорыва* характеризуется практической реализацией масштабных проектов освоения ближнего космоса, Луны и созданием условий для осуществления пилотируемого полета на Марс.

**Состав базовых элементов ПКИ.** С целью реализации мер по организации и осуществлению российской космической деятельности, часть из которых перечислена выше, в настоящее время обсуждается следующий состав базовых элементов ПКИ [1].

1. Перспективный пилотируемый транспортный корабль снабжения (ППТК-С).
2. Перспективный пилотируемый транспортный корабль для орбитальных полетов в автономном режиме на околоземных орбитах (ППТК-З).
3. Перспективный пилотируемый транспортный корабль для полетов на орбиту Луны (ППТК-Л).
4. Международная космическая станция (МКС).
5. Орбитальная станция нового поколения (ОС НП).
6. Межорбитальный буксир (МОБ).
7. Лунная орбитальная станция (ЛОС).
8. Лунный взлетно-посадочный комплекс (ЛВПК).
9. Лунная база (ЛБ).
10. Автоматические КА предварительного исследования объектов Солнечной системы (АКА-П) – беспилотные КА научного назначения, предназначенные для изучения небесных тел и космического пространства и проведения различных экспериментов.
11. Автоматические КА-роботы детального изучения объектов Солнечной системы (АКА-Р) – беспилотные КА научного назначения, предназначенные для детального (контактного) изучения небесных тел (планет, астероидов) и проведения различных экспериментов на их поверхности.
12. Дальняя космическая связь (ДКС).
13. Координатно-временное и навигационное обеспечение нового поколения (КВНО НП).
14. Двигательные установки нового поколения (ДУ НП).
15. Системы жизнеобеспечения нового поколения (СОЖ НП).
16. Системы радиационной защиты (СРЗ).
17. Робототехническое обеспечение нового поколения (РТО НП).
18. Перспективный пилотируемый транспортный корабль для возвращения экипажа с межпланетных траекторий на Землю (ППТК-М).
19. Марсианский взлетно-посадочный комплекс (МВПК).
20. Межпланетный буксир (МПБ).

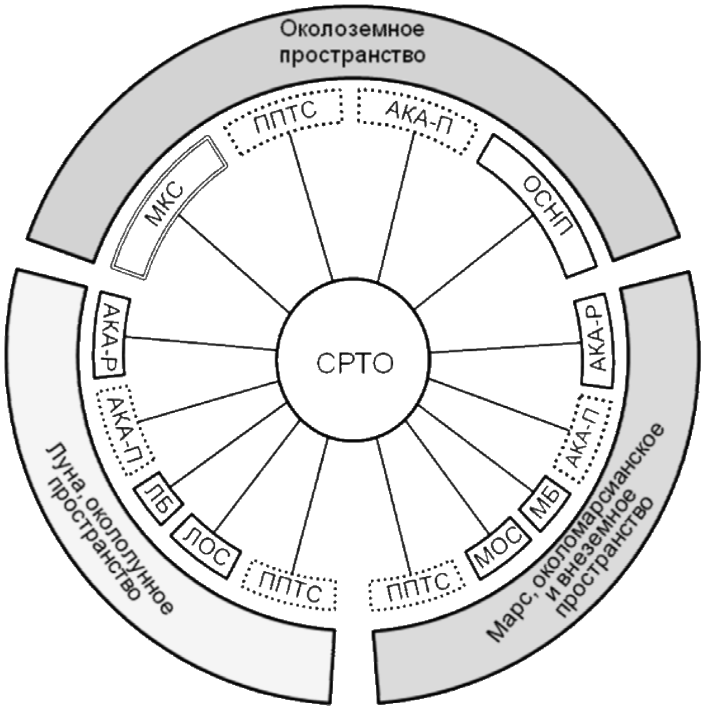



Рис. 1. СРТО в составе ПКИ

21. Марсианская орбитальная станция (МОС).

22. Марсианская база (МБ).

Анализируя данный перечень базовых элементов ПКИ, можно выделить те из них, в состав которых могут входить СРТО: ОСНП; АКА-Р; ЛОС; ЛБ; МОС; МБ.

Кроме того, МКС может и должна использоваться в качестве технической базы для отработки РТС КН и их отдельных элементов.

Применение РТС КН на кораблях перспективной пилотируемой транспортной системы (ППТС) – ППТК-С, ППТК-З, ППТК-Л, ППТК-М – и на АКА-П возможно, но на данный момент состав задач для РТС КН на этих объектах не определен.

На рис. 1 схематично изображены перечисленные объекты с обозначением их привязки по областям применения.

**Состав СРТО для ПКИ.** Сформулируем задачи, которые могут решать РТС КН в составе указанных выше базовых элементов ПКИ.

1. Работы на внешней поверхности КА:

инспекция, контроль состояния аппаратуры и систем КА;

установка, демонтаж и обслуживание аппаратуры и систем КА;

погрузка-разгрузка шлюзовых камер;

сборка крупногабаритных конструкций, монтажно-демонтажные работы;

безударная стыковка и перестыковка КА и модулей на ОС;

парирование нештатных ситуаций, ремонтно-восстановительные работы;

помощь космонавтам при осуществлении внекорабельной деятельности (ВнеКД).

2. Работы с кооперируемыми и некооперируемыми космическими объектами:

обслуживание (в т. ч. дозаправка и ремонт) КА, находящихся на орбите;

увод с орбиты «космического мусора».

3. Деятельность на планетах Солнечной системы и астероидах:

решение исследовательских задач;

строительство и обслуживание напланетных баз.

В ЦНИИ РТК обоснован и предложен следующий состав РТС КН, способных решать весь комплекс перечисленных задач:

1) транспортно-манипуляционная система (ТМС);

2) манипуляционные системы различного назначения;

3) напланетные робототехнические средства;

4) специализированные РТС КН.

*Транспортно-манипуляционная система* (рис. 2 *а*) – это многофункциональное мобильное робототехническое средство, способное решать широкий спектр задач, связанных с транспортировкой полезного груза и выполнением манипуляционных операций на внешней поверхности КА. Общие принципы построения и функционирования ТМС описаны в [3, 4].

ТМС способна выполнять следующие задачи:

инспекцию, контроль состояния аппаратуры и систем КА;

установку, демонтаж и обслуживание аппаратуры и систем КА;

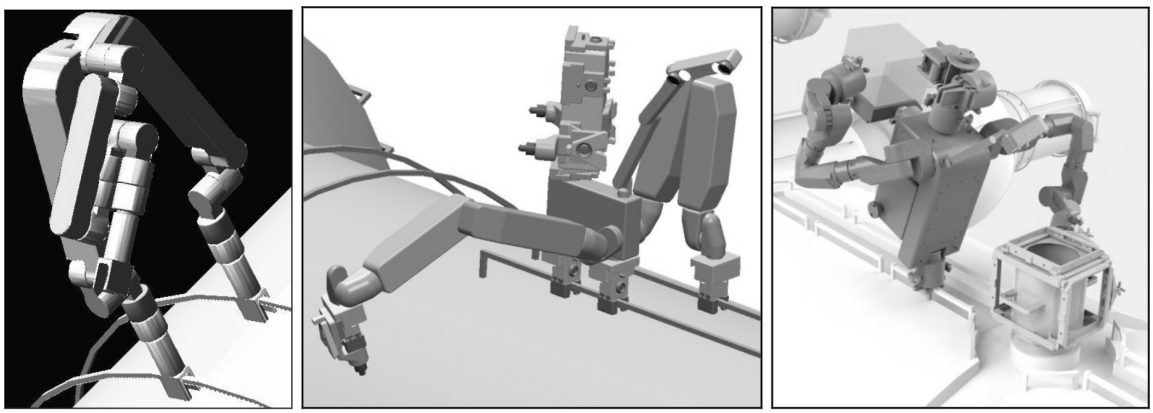
погрузку-разгрузку шлюзовых камер, транспортировку полезного груза по внешней поверхности КА;

сборку конструкций, монтажно-демонтажные работы;

ремонтно-восстановительные работы;

помощь космонавтам при осуществлении ВнеКД.

*а*)



*б*)

Рис. 2. СРТО для ПКИ:
*а* – ТМС (варианты); *б* – манипуляционные системы (размерный ряд)

*Манипуляционные системы* (рис. 2 *б*), такие, как, например, Canadarm, Canadarm2, – наиболее традиционные РТС КН. Как и ТМС, они являются многофункциональными РТС КН, однако могут применяться лишь для решения отдельных задач, связанных в первую очередь с манипулированием грузами большой массы.

Манипуляционные системы способны выполнять следующие задачи:

погрузку-разгрузку шлюзовых камер;

захват, стыковку и перестыковку КА и модулей ОС;

инспекцию (в пределах зоны досягаемости);

помощь космонавтам при ВнеКД (в пределах зоны досягаемости);

работу в составе пилотируемых и беспилотных сервисных КА (обслуживание КА на орбите, увод с орбиты «космического мусора»).

Имеет смысл отдельно остановиться на последней из упомянутых задач. В настоящее время в мире наблюдается повышенный интерес к данной теме, о чем свидетельствует, в частности, большое количество проектов, посвященных созданию и отработке сервисных КА и их манипуляционных систем с целью:

ремонта КА различного назначения, а также их частичной модернизации на орбите для продления ресурса;

дозаправки КА и замены расходных материалов;

увода с орбиты «космического мусора».

В качестве примеров можно назвать космические эксперименты ETS-VII [5], Orbital Express [6], проект SUMO/FREND [7], работы по созданию манипуляторов Canadarm нового поколения [8] и целый ряд других проектов. В целом можно констатировать, что проблема создания сервисных КА (например, на базе упомянутых выше АКА-Р) и их СРТО является актуальной и перспективной.

*Специализированные РТС КН* предназначены для решения узкоспециализированных задач, которые с их помощью могут быть решены более эффективно, чем с использованием многофункциональных РТС КН. К таким задачам можно отнести:

ориентирование антенн (например, в системах сближения и стыковки КА, системах связи и пр.);

перестыковку ранее пристыкованных КА и модулей на ОС;

облегчение работы космонавтов при ВнеКД за счет использования скафандра-экзоскелета (т. е. скафандра, конструктивно совмещенного с манипуляторами-экзоскелетами, увеличивающими мышечные усилия космонавта) и т. д.

*Напланетные робототехнические средства* предназначены для функционирования на планетах Солнечной системы (Луна, Марс) и астероидах для выполнения следующих задач:

проведения исследований планет и астероидов;

строительства, модернизации, обслуживания и ремонта напланетных баз и сооружений.

Примерами ранее созданных напланетных робототехнических средств являются советские аппараты Луноход-1 и Луноход-2, американские марсоходы Spirit и Opportunity [9].

Приведенные выше данные сведены в таблицу. В ней также дана оценка предполагаемого объема задач, выполняемых каждым видом РТС КН, относительно общего количества задач, существующих в соответствующих направлениях.

**Сценарий создания СРТО в составе ПКИ.** В ЦНИИ РТК по заданию Центрального научно-исследовательского института машиностроения выполняется разработка прогнозного сценария («дорожной карты») создания отечественных СРТО функций базовых элементов ПКИ. В ходе данной работы должны быть решены следующие задачи:

определение потребностей в СРТО, а также состава СРТО при развертывании, эксплуатации и обслуживании элементов ПКИ;

определение интеллектуальных и материальных ресурсов, требуемых для разработки СРТО;

определение требуемых временных ресурсов, последовательности и сроков создания СРТО;

определение предварительных тактико-технических характеристик СРТО;

оформление наглядной формы представления («дорожной карты») сценария создания СРТО.

На рис. 3 показана графическая схема, отражающая предложение ЦНИИ РТК о возможном сценарии создания отечественных СРТО. Данная схема представляет собой развертку по годам (с 2010 по 2050 гг.), иллюстрирующую прогноз по научно-исследовательским (НИР) и опытно-конструкторским (ОКР) работам, которые требуется провести для создания СРТО, в соответствии с предложенным выше составом РТС КН. Приведены как уже выполняемые работы по созданию

**Виды РТС КН и выполняемые ими задачи**

| Виды РТС КН | ТМС | Манипуляционные системы | Специализированные РТС КН | Напланетные РТС КН |
|---|---|---|---|---|
| Работы на внешней поверхности КА | Инспекция<br>Обслуживание аппаратуры<br>Обслуживание шлюзовых камер<br>Монтажно-демонтажные работы<br>Ремонтно-восстановительные работы<br>Обеспечение ВнеКД | Обслуживание шлюзовых камер<br>Стыковка и перестыковка КА и модулей ОС<br>Инспекция<br>Обеспечение ВнеКД | Специализированные задачи (перестыковка, ориентирование антенн и пр.) | |
| Работы с кооперируемыми и некооперируемыми космическими объектами | | Ремонт и модернизация КА<br>Дозаправка КА<br>Увод с орбиты «космического мусора» | Специализированные задачи | |
| Деятельность на планетах Солнечной системы и астероидах | | | Специализированные задачи | Исследования<br>Строительство напланетных сооружений |
| Обозначения | | | | |
| Оценка объема выполняемых задач | Большой объем задач | Отдельные задачи | Задачи отсутствуют | |

РТС КН и их компонентов, так и предлагаемые для выполнения. Показаны обобщенные названия НИР и ОКР, каждая из которых может потребовать выполнения связанных составных частей работ или отдельных работ. Все работы поделены на этапы, согласующиеся с порядком создания, производства и эксплуатации космических комплексов, предписанным Положением РК-98-КТ.

На схеме видно, что основной упор (за счет объемов работ) сделан на отработке компонентов и технологий создания РТС КН. Полученные результаты затем должны использоваться во всех последующих работах, в т. ч. для создания конкретных видов СРТО.

Примером уже выполняемой в ЦНИИ РТК работы является ОКР «Роботрон-РТК» (2010–2012 гг.), цель которой – создание функциональных модулей (шарниров и захватных устройств) для использования в будущем при построении робототехнических систем различного, в первую очередь космического назначения. Развивая эту работу, в ЦНИИ РТК начата ОКР «Захват-Э» по созданию научной аппаратуры для космического эксперимента «Захват-Э». Цель эксперимента – создание унифицированных мехатронных модулей для РТС КН и отработка их функционирования в составе специализированной манипуляционной системы на наружной поверхности российского сегмента МКС.

На схеме не обозначены работы, заведомо не обладающие научной новизной или существенной практической значимостью. В частности, работы по созданию специализированных технических устройств постоянно проводятся во многих отечественных организациях, включая ЦНИИ РТК. Поскольку потребность в таких устройствах будет возникать постоянно на основе текущих оперативных задач, планировать эту потребность практически невозможно и бессмысленно. Из перспективных работ по этому направлению можно выделить разработку скафандра-экзоскелета, а также манипулятора-перестыковщика, применение которого позволит воплотить планы по созданию реконфигурируемых ОС.

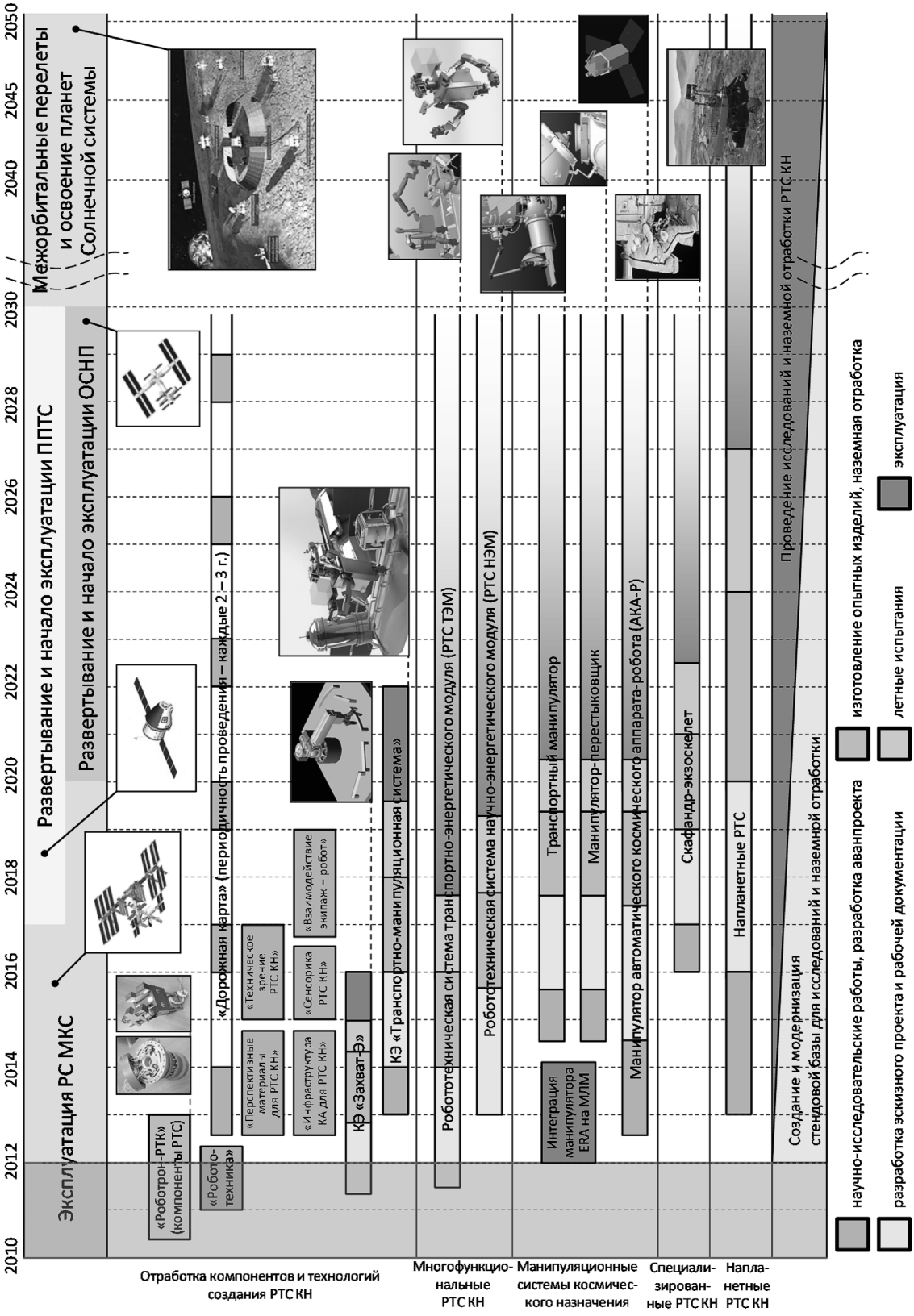



Рис. 3. Сценарий создания СРТО в составе ПКИ

В нижней части схемы условно показаны работы, которые требуется регулярно проводить для создания и поддержания на современном уровне стендовой базы для исследований и наземной отработки РТС КН.

В ЦНИИ РТК проводится разработка прогнозного сценария («дорожной карты») создания отечественных СРТО функций базовых элементов ПКИ. В ходе работ проанализированы основополагающие документы, позволяющие определить задачи СРТО, сформулированы предложения по составу СРТО для ПКИ. Предлагаемый прогнозный сценарий выполнен в виде графической схемы, иллюстрирующей состав и взаимосвязь НИР и ОКР, которые требуется провести для создания СРТО, с привязкой этих работ по годам (с 2010 по 2050 гг.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы и направления решения задач по развитию перспективных космических средств для дальнейшего исследования и освоения космического пространства [Текст] / Системный проект. –ЦНИИмаш.

2. Проект Стратегии развития космической деятельности России до 2030 г. и на дальнейшую перспективу [Текст].

3. **Лопота, В.А.** Транспортно-манипуляционная система для обслуживания Международной космической станции и поддержки внекорабельной деятельности космонавтов [Текст] / В.А. Лопота, А.М. Потапов, А.А. Градовцев, А.И. Каргов, И.Ю. Даляев // Мехатроника, автоматизация, управление. –М.: Изд-во «Новые технологии», 2011. –№ 2. –С. 6–16.

4. **Градовцев, А.А.** Робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры [Текст] / А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.Н. Тимофеев// Экстремальная робототехника: Труды Междунар. науч.-технич. конф. 23–25 ноября 2011. –СПб., 2011.

5. Engineering Test Satellite VII «KIKU-7» (ETS-VII) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.jaxa.jp/projects/sat/ets7/index_e.html

6. Orbital Express [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/index.html

7. FREND: Pushing the Envelope of Space Robotics [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.nrl.navy.mil/content_images/08Space_Kelm.pdf

8. The Next-Generation Canadarm: Building on an Icon [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.asc-csa.gc.ca/eng/canadarm/ngc.asp

9. Mars Exploration Rover Mission: Home [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html

УДК 004.896

*И.А Васильев, С.А. Половко, Е.Ю. Смирнова*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ОРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ ДЛЯ ЗАДАЧ СПЕЦИАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

*I.A. Vasilyev, S.A. Polovko, E.Yu. Smirnova*
*St.-Petersburg, Russia*

# A GROUP OF MOBILE ROBOT ORGANIZATION FOR SPECIAL ROBOTICS PROBLEMS

Рассмотрены проблемы организации распределенной системы управления гетерогенной группировкой мобильных роботов для применения в специальных условиях и экстремальных ситуациях.

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ. НАВИГАЦИЯ. СЕНСОРЫ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ.

The problems of the organization of a distributed control system of a heterogeneous group of mobile robots for use in special conditions and emergencies are considered.

GROUP CONTROL. MOBILE ROBOTS. NAVIGATION. SENSORS. OPERATIONS.

## Постановка задачи, общие положения

Преимущества группового применения роботов в задачах экстремальной робототехники очевидны. Это и больший радиус действия, достигаемый за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне, и расширенный набор выполняемых функций, достигаемый за счет установки на каждого робота индивидуальных исполнительных устройств, и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них. Поэтому такие сложные задачи специальной робототехники, как масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе и под водой, участие в боевых, спасательных и обеспечивающих операциях, разминирование территорий и т. п., могут эффективно решаться роботами только при их групповом взаимодействии. При этом возникают новые проблемы группового управления и коммуникации, связанные с организацией группового взаимодействия роботов.

Под группой роботов принято понимать группу мобильных объектов, координирующих свои действия для достижения общей цели [1].

Задачей группового управления можно назвать задачу определения и оперативной оптимизации ресурсов группы, обеспечивающих реализацию действий членов группы, необходимых для достижения групповой цели. Поскольку данная задача должна решаться с минимальным участием человека-оператора, будем говорить об интеллектуальном групповом управлении как об основном режиме управления для этого случая.

Одной из существенных сторон интеллектуального группового управления является самоорганизация. По мнению большинства исследователей, самоорганизующиеся явления (СО-явления) в естественных системах возникают из-за потери устойчивости предыдущего состояния системы в силу изменившихся внешних условий. Возникающее в соответствии с естественными законами природы новое состояние иногда оказывается «организованной структурой» [2]. В этом случае указанный переходной процесс в естественной системе называется *самоорганизующимся*. Важнейшей особенностью возникающей «организованной структуры» является ее устойчивость в сложившихся условиях. При этом в естественных условиях законы природы являются теми детерминирующими факторами, под влиянием кото-

рых протекает процесс самоорганизации. Как правило, естественная система имеет локальный минимум энергии в состоянии, соответствующем «организованной структуре».

С другой стороны, в работе [2] формулируется важное, на наш взгляд, положение о том, что самоорганизация всегда идет в соответствии с «вертикальным» и «горизонтальным» операционными принципами по определенным локальным правилам самоорганизации. При этом новые вертикальные уровни возникают тогда, когда «горизонтальное СО-явление» достигает своего предела сложности. Другими словами, для возникновения процесса искусственной самоорганизации в технической системе она должна быть построена в соответствии с определенными правилами – локальными правилами самоорганизации. Можно считать, что эти правила играют ту же детерминирующую роль в искусственной самоорганизации, что и законы природы в естественных самоорганизующихся системах.

Наряду с традиционными проблемами робототехники при групповом применении роботов возникает ряд новых проблем, и прежде всего это проблема организации взаимодействия роботов в группах при решении сложной целевой задачи и проблема коммуникации, связанная с организацией взаимодействия роботов.

Перейдем к отдельным задачам группового управления. Первой из них является определение состава и структуры группы, необходимой или даже наилучшей, для выполнения поставленной функциональной задачи. Если состав уже задан, то остается задача определения структуры группы, а также оперативного переконфигурирования, при выпадении отдельных членов группы или появления новых.

Вторая задача состоит в создании СУ группы, т. е. СУ групповых действий. Такая СУ может быть локализована на единственном роботе или распределена по группе, т. е. быть централизованной или децентрализованной. Для гетерогенной группы целесообразно выделение одного робота (как правило, с самыми мощными вычислительными ресурсами) для центра такого управления, с распределением некоторых общих функций и на других роботах группы и резервированием всех жизненно важных функций на других роботах.

Так как в общем случае для решения конкретной целевой задачи могут использоваться не все роботы группы, то для реализации задачи группового управления в целом должны быть решены следующие подзадачи:

формирование активной части группы – кластера как совокупности роботов, сформированной для достижения той или иной конкретной цели;

оптимальное (или близкое к нему) распределение функций между роботами группы, а также перераспределение этих функций при изменении ситуации;

реализация функций роботами, входящими в кластер.

С учетом специфики прикладной области экстремальной или специальной робототехники выбрана гетерогенная структура группы (более мощный по вычислительным ресурсам робот организует работу членов группы).

Для практической реализации выделим следующие алгоритмические задачи:

разработка логики функционирования группы;

разработка логики функционирования робота в группе;

разработка логики иерархии в группе, т. е. при каких условиях и в каких состояниях роботы будут играть роли «лидеров» и «подчиненных»;

разработка алгоритмов коммуникации и взаимодействия в группе мобильных роботов;

проработка технического облика группы мобильных роботов;

определение состава интеллектуальной системы навигации для группы мобильных роботов;

разработка алгоритмов управления оборудованием мобильного робота с учетом обобщенной информации, циркулирующей между членами группы;

разработка алгоритмов групповой навигации с использованием информации от всех навигационных устройств роботов группы;

разработка унифицированного бортового программного обеспечения, обеспечивающего комплексную обработку групповой информации (навигационной, видео и т. д.).

**Методы исследований**

Под гетерогенной группой роботов здесь понимается группа роботов с различным устройством, алгоритмами управления и задачами, а также наличием централизованного автоматического управления каждой гомогенной подгруппой. Задачи, решаемые группой гетерогенных роботов, аналогичны задачам для гомогенных

групп, однако гетерогенная специфика увеличивает число степеней свободы, понимаемых в широком смысле.

Действие группы можно разбить на последовательные или локально последовательные действия подгрупп ведущих роботов и подгрупп ведомых роботов. Отдельную роль могут представлять как один робот, так и гомогенная подгруппа. Задача разбивается на подзадачи согласно специфике отдельных ролей, которые могут также и пересекаться. Подобные задачи решаются при помощи распределенных систем управления, совместного наблюдения и передачи информации, с той разницей, что гетерогенная группа требует различного подхода к системам навигации для различных типов роботов.

Чаще всего гетерогенность необходима для успешного распределения ролей с целью обеспечения лучшего охвата патрулируемой территории.

Например, гетерогенный комплекс состоит из двух подгрупп одинаковых роботов (две гомогенных подгруппы). Первая, ведущая подгруппа, это подгруппа относительно больших роботов. Они снабжены мощными бортовыми вычислителями, большим набором сенсоров (дальномеры, телекамеры, сонары и т. д.) и предназначены для постановки задач группировке малых роботов и анализу показаний датчиков малых роботов.

Вторая, ведомая подгруппа состоит из малых роботов, снабженных более слабыми бортовыми вычислителями, малым набором сенсоров и предназначена для выполнения локальных заданий ведущей группы в плане обзора недоступных большим роботам целей и объектов.

Обе группировки роботов снабжены средствами связи по радиоканалу. Характер информационного обмена в группе роботов во многом зависит от выбора стратегии управления группой роботов. Стратегии централизованного управления группой роботов делятся на два класса: использующие принципы единоначального управления и использующие принципы иерархического управления [3].

Для экспериментальной рабочей зоны должно выполняться условие связности рабочей зоны. В любой сегмент рабочей зоны должен быть такой путь, по которому может проехать хотя бы малый робот.

Объекты интереса, которые требуется найти, не должны сливаться с фоном и иметь соответствующие датчикам размеры и поверхности.

В состав комплекса также входит удаленный пульт управления для человека-оператора. Человек-оператор посредством этого пульта может выполнять следующие действия:

задавать сценарии работы комплекса;

задавать цели (супервизорный режим);

принимать решения и брать управление на себя в сложных ситуациях;

указывать на выход из тупиковых ситуаций;

контролировать работу комплекса на основании прогноза состояния группы.

**Описание полученных результатов**

Для проведения экспериментов создан макет группы, выполняющей задачи патрулирования помещений, обнаружения опасных объектов и т. п.

В данной работе использовалась группировка из трех разных мобильных роботов (рис. 1).

Технические характеристики этих роботов следующие.

1. Большая шестиколесная платформа включает в себя:

аккумуляторные батареи большой емкости – два автомобильных аккумулятора;

мощный бортовой вычислитель – промышленный компьютер;

радиоканал на стандарте WiFi;

одометры – два датчика колес (по одному на каждую сторону);

лазерный сканирующий дальномер, основной датчик для навигации платформы;

набор бесконтактных выключателей, по два в каждую сторону, итого 8 шт.

2. Средняя платформа – трехколесный мобильный робот «Pioneer», включает в себя:

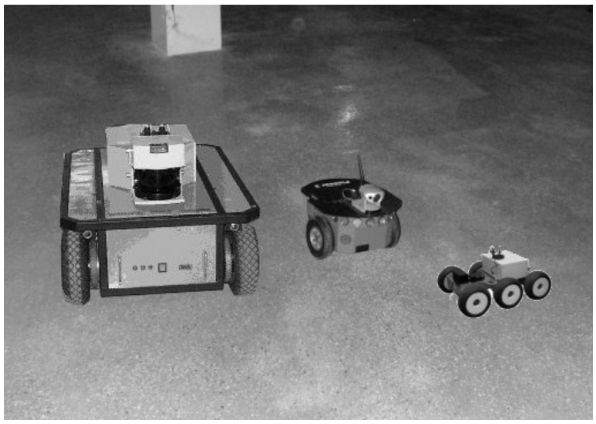


Рис. 1. Группировка из трех мобильных роботов

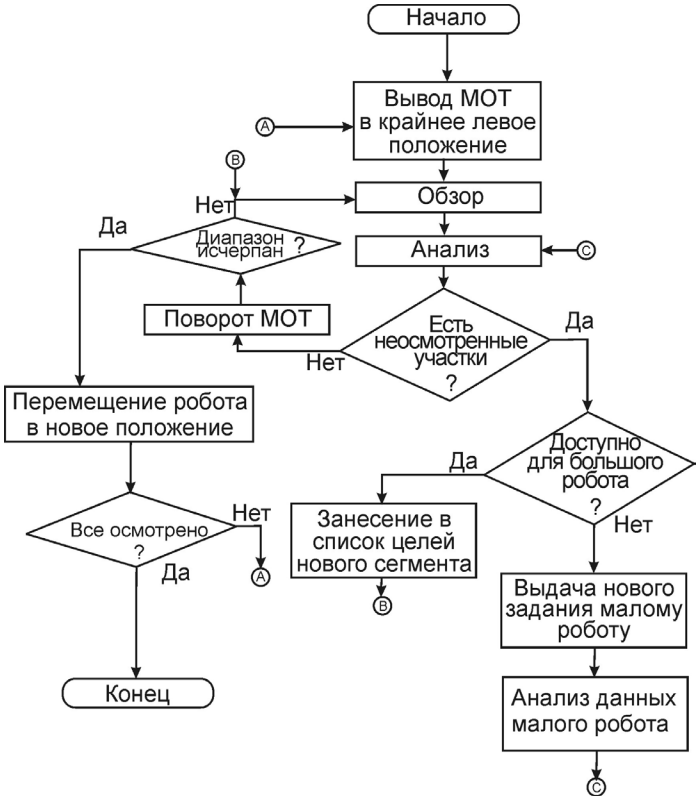



Рис. 2. Блок-схема алгоритма осмотра зоны патрулирования

аккумуляторы средней емкости;

мощный бортовой вычислитель;

радиоканал на стандарте WiFi;

одометры – два датчика, по одному на каждую сторону;

набор шестнадцати ультразвуковых дальномеров, расположенных по окружности;

телевизионную камеру, входящую в систему технического зрения, как основной датчик для навигации.

3. Малый шестиколесный мобильный робот «МИГ», включает в себя:

аккумуляторы средней мощности;

бортовой вычислитель со встроенной системой радиоканала;

одометры – по одному датчику на каждое колесо, итого 6 датчиков;

модуль из трех ультразвуковых дальномеров для уклонения от препятствий;

бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) – основной датчик навигации.

**Осмотр рабочей зоны.** Задачи патрулирования являются, по существу, задачами осмотра патрулируемой территории. Для осмотра характерно наличие возможности проникновения в различные труднодоступные сегменты территории. Эти алгоритмы просты и, фактически, служат конечными автоматами [2–4].

Алгоритм осмотра в виде блок-схемы приведен на рис. 2.

**Построение карты рабочей зоны.** Для успешного патрулирования желательно иметь карту патрулируемой территории. Построение карт осуществляется посредством обзора территории.

Процесс построения карты состоит из трех этапов:

1) занесение в рабочий список вновь увиденных сегментов. На первом этапе строится не карта, а лишь конфигурация взаимного расположения предметов в рабочей зоне;

2) уточнение координат уже осмотренных объектов по этапу 1 посредством приближения к ним. Производится несколько замеров этих координат для определения среднего и дисперсии;

3) занесение координат в окончательную базу, которую уже называем *картой местности*.

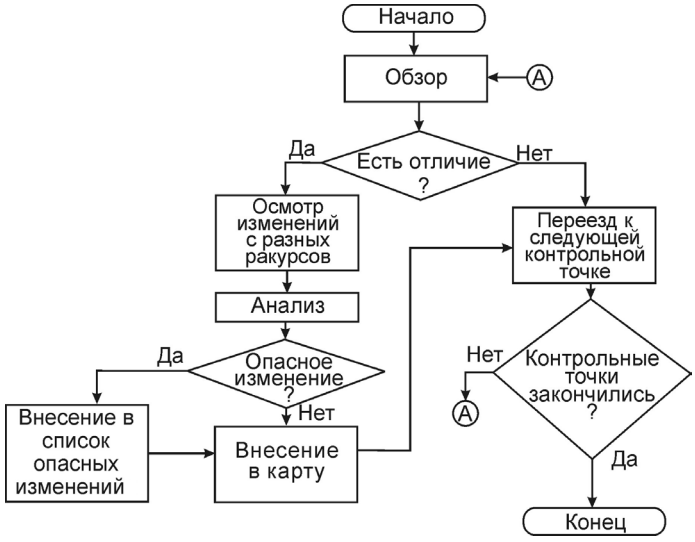



Рис. 3. Блок-схема алгоритма патрулирования

**Групповое патрулирование рабочей зоны и анализ обнаруженных предметов.** Групповое патрулирование необходимо для контроля изменений в рабочей зоне. Под изменениями понимается любое отличие текущей сцены от ранее запомненной и внесенной в карту. Причем все изменения в рабочей зоне должны быть классифицированы. Классы изменений таковы [4–5]:

1) изменение знакомых (т. е. внесенных в карту) предметов. В качестве примеров здесь могут быть такие, как открытая дверь (если ранее она была закрыта) или выдвинутый ящик стола;

2) перемещение знакомых предметов. Например, нахождение в другом месте предмета мебели, внесенного в карту на предыдущем этапе;

3) исчезновение знакомого предмета;

4) наличие незнакомого предмета.

В зависимости от конкретных целей патрулирования производится анализ выявленных изменений рабочей зоны. В случае макетирования для анализа используются два критерия – цвет и форма. Пирамидообразные предметы, а также ярко-красные и ярко-синие являются «опасными» и требуют принятия мер.

Блок-схема алгоритма патрулирования представлена на рис. 3.

Практический опыт показал, что гетерогенная группировка мобильных роботов является очень гибким инструментом решения большинства задач разведки, патрулирования, наблюдения и, возможно, даже охраны, которые возлагаются на мобильную робототехнику XXI века.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каляев, И.А.** Планирование коллективных действий при управлении группой роботов-лифтов [Текст] / И.А. Каляев // Искусственный интеллект. –2001. –№ 3.

2. **Каляев, И.А.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов [Текст] / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. –М.: Физматлит, 2009. –280 с.

3. **Картавцев, К.В.** Модель детерминированной сети роботов [Текст] / К.В. Картавцев, О.Н. Мелехова, С.В. Тимченко // Доклады ТУСУРа. –2010. –№ 1 (21). –Ч. 1.

4. **Иванов, Д.Я.** Информационный обмен в больших группах роботов [Текст] / Д.Я. Иванов // Искусственный интеллект. –2010. –№ 4.

5. **Тимофеев, А.В.** Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами [Текст] / А.В.Тимофеев, Р.М. Юсупов // Information Technologies & Knowledge. –2011. –Vol. 5. –№ 3.

УДК 004.896:629.3

*А.В. Васильев*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ШАССИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ПЛАНЕТОХОДОВ

*A.V. Vasiliev*
*St.-Petersburg, Russia*

# DEVELOPMENT AND CLASSIFICATION PRINCIPLES OF GROUND MOBILE ROBOT'S AND PLANET ROVER'S CHASSIS

Рассмотрены схемные и конструктивные решения, нашедшие применение при создании шасси наземных (напланетных) РТС. Разработана классификация шасси, основанная на анализе их адаптационных способностей. Предложены принципы и правила составления оригинальной формульной записи схемы шасси, служащей для краткого описания ее структурного состава.

ШАССИ. РОБОТ. ПЛАНЕТОХОД. КЛАССИФИКАЦИЯ. ФОРМУЛА. АДАПТАЦИЯ.

Schematic and construction decisions of ground (planet) rover's chassis are considered. The chassis classification based on adaptability is developed. The original formula principles and compose rules are proposed.

CHASSIS. ROBOT. PLANET ROVER. CLASSIFICATION. ADAPTABILITY.

Способы передвижения современных наземных робототехнических систем (РТС) характеризуются большим разнообразием. Основой любого мобильного робота (МР) или планетохода является шасси той или иной конструкции. Шасси (или самоходное шасси)[1] представляет собой совокупность частей, обеспечивающих передачу механической энергии от двигателей к активным элементам движителя (ЭД) – ведущим колесам, звездочкам, шкивам, выходным звеньям механизмов изменения геометрии шасси или механизмов шагания и т. п., – объединенных вместе с приводами в функциональную конструктивную подсистему.

Цель данной статьи – как можно более полный структурный анализ и систематизация применяемых на сегодняшний день схем шасси (СШ). По результатам анализа большого количества разработок предлагается классификация конструктивных и схемных решений шасси, нашедших отражение в проектах различных МР, делается вывод о тенденциях развития и принципах их построения.

[1] Здесь термины «шасси» и «самоходное шасси» для краткости рассматриваются как эквивалентные, хотя, строго говоря, это не так.

**Принципы передвижения наземных РТС**

Шасси и примененный движитель во многом определяют как конструктивный облик МР, так и его функциональные возможности, главная из которых – способность к передвижению в недетерминированной среде и приспособляемость к сложным условиям движения. В конструкциях наземных РТС, по аналогии с транспортными машинами общего назначения, традиционно находят применение колесный и гусеничный движители с простейшими схемами шасси: фиксированной конфигурации и различным числом ЭД. В то же время общая тенденция развития наземных (впрочем, как и других) РТС в сторону миниатюризации [4], возрастающие требования по профильной проходимости МР с одновременным снижением размеров и массы [1] приводят к необходимости усложнения конструкций шасси путем добавления различных пассивных или активных механизмов адаптации. Это позволяет существенно повысить показатели профильной проходимости машины и наделить ее рядом дополнительных функций [1].

Также развиваются теоретические исследования и создаются конструкции МР (в т. ч. малогабаритные) с шагающим (например, Boston Dynamics (США), ВолгГТУ (Россия)) и ползающим (Hirose

Развитие принципов построения шасси мобильных роботов и РТС

Fukushima Robotics (Япония), University of Hamburg (Германия), Carnegie Mellon University (США), ЦНИИ РТК (Россия)) принципами передвижения. Заметим, что ползающую схему можно рассматривать как многомодульную сочлененную структуру, передвигающуюся только за счет движений в межмодульных шарнирах (а не за счет движения каждого из отдельных модулей, оснащенных, к примеру, колесным движителем). В этом смысле ползающие схемы рассматриваются как некий подкласс сочлененных.

На рисунке в схематичной форме приведены результаты анализа принципов построения шасси с точки зрения повышения их адаптационных способностей.

Таким образом, как это принято для транспортных машин, шасси наземных РТС первоначально делятся на несколько классов, характеризуемых выбранным принципом передвижения [7]. Здесь, в рамках предлагаемой классификации, выделяются следующие классы шасси:

колесные;
гусеничные;
шагающие;
гибридные (комбинированные);
сочлененные.

При этом к гибридным (комбинированным) относятся схемы, имеющие в своем составе атрибуты нескольких классов одновременно (колесно-гусеничные, колесно-шагающие, гусенично-рычажные и т. п.). В этих схемах первостепенную роль играет не тип примененного основного движителя, а конструктив адаптационных механизмов шасси. Например, в шасси робота SandFlea (Boston Dynamics) для преодоления значительных препятствий предусмотрен адаптационный механизм, включающий в себя рычаги для наклона корпуса и специальный привод поршневого типа, способный с силой вытолкнуть робот в заданном направлении, обеспечивая ему прыжок на высоту до 8 (!) м. При этом в качестве базы здесь выступает простое четырехколесное шасси. Очевидно, что преобладающую роль в этой разработке играет именно примененный адаптационный механизм, а не выбранный тип движителя. Поэтому данную схему шасси целесообразно отнести к классу гибридных шасси с колесным типом движителя и использованием специальных рычагов.

В другом варианте [10] в качестве адаптационного механизма шасси используется исполнительное оборудование робота (в данном случае, манипулятор, снабженный пассивными колесами). В связи с этим такое конструкционное решение можно отнести к гибридным схемам с

шестиколесным движителем с использованием в качестве механизма повышения проходимости исполнительного оборудования МР.

### Критерии классификации

Классификация построена на основе пошагового анализа схем шасси по степени их конструктивного усложнения по пути *повышения адаптационных способностей*. Анализ проводится путем определения *числа степеней подвижности* (т. е. подвижных элементов) в той или иной функциональной подсистеме шасси. Всего выделяется три основных функций шасси: передвижение, маневрирование и преодоление препятствий.

Так, на первом этапе определяется способ передвижения и число подвижных ЭД (двух-, трех-, четырех-, шести-, восьмиколесная, двух-, четырех-, шестигусеничная и т. п.), затем, в первую очередь для колесного движителя, – число приводных и ведомых элементов движителя, а также выбранный способ маневрирования (бортовой или с помощью управляемых ЭД). Для гусеничных шасси в силу их природы применяется бортовой способ поворота – он подразумевается по умолчанию. Тем не менее в очень редких случаях в практике гусеничной техники встречаются варианты поворота за счет изгиба гусеничной ленты (например, шасси танка Mk VII Tetrarch, приведенное в работе [3]). В области мобильной робототехники можно упомянуть робот Aurora компании Automatika Inc. (США), построенный по одногусеничной схеме, поворот которого осуществляется за счет изгиба гусеницы. В колесных роботах в подавляющем большинстве случаев также используется бортовой («танковый») способ поворота. Поэтому здесь он также подразумевается по умолчанию, а наличие управляемых ЭД оговаривается особо.

Последним этапом анализа является оценка адаптационных способностей шасси. Рассматривается тип адаптационного механизма (шарниры излома рамы (корпуса), поворотные модули (колесные, гусеничные, рычаги) и т. п.), оценивается число степеней подвижности (активных и пассивных).

В заключении, на основании проведенного анализа, рассматриваемой схеме шасси присваивается формула – некая краткая запись структурного состава шасси МР, составленная по определенным правилам.

### Формульная запись схемы шасси МР

Для составления формулы используются буквы русского алфавита (исключение – латинская «S» (от англ. Segway)), арабские цифры и специальные знаки (знак умножения «×» и разделитель «/»).

Обозначения элементов формулы:

К – колесный ЭД;

Г – гусеничный ЭД;

О – ЭД в виде «омниколеса» (колесо типа «mecanum-wheel» в схеме Omni Directional Drive);

Шр – шарообразный ЭД;

Ру – рулевой механизм;

У – управляемый (поворотный) ЭД;

Л – опорный элемент типа «лыжа»;

Н – опорный элемент типа «нога»;

Р – опорный элемент типа «рычаг»;

Б – опорный элемент типа балансирное (рояльное) колесо;

Кп – опорный элемент типа пассивное колесо с неподвижной осью;

П – пассивный шарнир (степень подвижности);

А – активный шарнир (степень подвижности);

Ш – шарнир механизма шагания;

М – манипулятор (исполнительное оборудование МР);

Пр – прыгающий механизм;

С – секция сочлененной машины;

мС – обозначение многомодульной сочлененной схемы;

мР – обозначение многомодульной реконфигурируемой схемы;

S – система динамической стабилизации, подобная используемой в мобильных платформах фирмы Segway.

В обозначениях схем принимаются следующие допущения. По умолчанию считается, что колесная схема имеет индивидуальный привод каждого колеса, если это не обозначено дополнительно. Тогда общепринятая для колесной техники запись колесной формулы 4×4 в рамках принимаемых обозначений должна выглядеть как 4×4К (четыре колеса и все четыре ведущих), но в силу сказанного выше заменяется упрощенной формой вида 4К. Аналогично колесная формула 6×6 запишется просто как 6К и т. д.

Формулы составляются по следующим правилам:

- каждый элемент формулы обозначается

прописной буквой или комбинацией из прописной и строчной букв (например: К – колесо, А – активная (приводная) степень подвижности, Ру – рулевой механизм, мС – многомодульная сочлененная схема и т. п.);

• цифра, стоящая перед обозначением элемента, указывает на число этих элементов (например: 4К – четырехколесный движитель, 2А – два активных шарнира механизмов изменения геометрии шасси);

• элементы формулы, имеющие одинаковое количество и стоящие последовательно друг за другом, для сокращения записи объединяются под одной цифрой, которая относится соответственно к каждому из этих элементов. Например: запись 6К6У (шестиколесная схема с шестью управляемыми (поворотными) колесами) сокращается до 6КУ, а запись 4Г4У4А (четырехгусеничная схема с четырьмя приводами поворота гусениц вокруг вертикальной оси и четырьмя приводами вращения гусеничных модулей) может быть сокращена до вида 4ГУА;

• знак «×» применяется для указания на нетипичную для мобильных роботов колесную формулу. Например: 4×2К (автомобильная схема: четыре колеса, два ведущих) или 12×4К (двенадцатиколесная схема с четырьмя приводными колесными модулями). Также он может указывать на то, что элементы, следующие после этого знака, содержатся в указанном количестве в каждом из элементов до него. Например: 2СП×2Г1П (двухсекционная сочлененная схема с двухстепенным соединительным шарниром, каждая секция которой представляет собой двухгусеничное шасси с одним пассивным шарниром);

знак «/» используется в качестве разделителя, например, для отделения двух следующих друг за другом букв (элементов) в случае, если цифра перед ними относится только к первой букве. Например: 6К/М3А – МР с шестиколесным движителем без механизмов изменения геометрии с использованием для повышения проходимости трехстепенного манипулятора [10]. Также он может применяться в обозначениях схем, подобных шасси трехсекционного сочлененного марсохода ВНИИтрансмаш (схема 3С×2К/5А).

Аналогично пошаговой последовательности проведения анализа формула шасси тоже формируется на основе последовательного рассмотрения конструкции шасси (число элементов движителя – число управляемых элементов – тип и состав адаптационных механизмов).

**Классификация схем шасси**

Результаты анализа структурного состава и кинематических связей СШ МР различных назначений и массогабаритных характеристик представлены в табл. 1, 2. Табл. 1 отведена под колесный и гусеничный классы по принципу передвижения, табл. 2 – остальные. Остановимся подробнее на каждом из них.

Наибольшее распространение среди колесных СШ в силу своей простоты получили четырех- и шестиколесные схемы (4К и 6К) с индивидуальными приводами колес (мотор-колес) и бортовым способом поворота. Двухколесные СШ в силу своей статической неустойчивости различаются по типу применяемой пассивной опоры (в виде рычага или «хвоста» – схема 2К, в виде рояльного колеса – схема 2К/Б) или используют систему динамической стабилизации на основе гироскопических датчиков (схема 2К/S).

Существуют четырехколесные СШ «автомобильного» типа с задними ведущими и передними управляемыми колесами (схема 4×2К1Ру). Как правило, подобные разработки основываются на опыте создания радиоуправляемых машинок для хобби (RC-модели). Также находят применение схемы со всеми управляемыми колесами. В качестве примера можно привести ходовой макет планетохода ХМ-7 [9] ВНИИТрансмаш (схема 6КУ).

Развитием простых колесных схем стало появление СШ с пассивными шарнирами излома корпуса (пример: схема 6К1П, приведенная в [1]), шарнирами подвески (марсоходы NASA (США) – 6КУ4П, ДР РХР (ЦНИИ РТК, Россия) – 6К3П и др.) и приводными (активными) степенями (схема 6К1А в [6], 8К1А и др.), способствующими повышению проходимости МР.

Дальнейшее повышение эффективности и функциональности колесного движителя применительно к наземным РТС связано, во-первых, с совершенствованием конструкции колеса (разработки ВНИИтрансмаш [9], Macroswiss и др.), во-вторых, с созданием гибридных СШ (колесно-шагающие, колесно-гусеничные, колесно-рычажные).

Наиболее распространенные гусеничные СШ типа 2Г в сравнении со схемами 2К и 6К обеспечивают более низкое удельное давление и более высокие тяговые возможности на слабонесущих грунтах, но отличаются несколько большей конструктивной сложностью и большими динамическими нагрузками при преодолении препятствий. Для повышения показателей профильной прохо-

димости применяются схемы гусеничного движителя с изменяемой геометрией (ИГ) различных конструкций: от двухгусеничных СШ с изменяемым положением рычагов с направляющими колесами (2Г1А) до шестигусеничных. Последние применительно к одному борту имеют одну основную и две дополнительных гусеницы, вращение которых осуществляется от одного общего привода. Дополнительные гусеницы устанавливаются на поворотных рычагах с концевыми роликами и направляющими гусениц. Вращение передних и задних рычагов может быть осуществлено как от общих (передних и задних) приводов (схема 6Г2А), так и каждого рычага от своего индивидуального привода (6Г4А).

Стремление к повышению эффективности СШ с гусеничным движителем также привело к появлению различных гибридных схем.

Шагающие СШ МР делятся на схемы с одностепенными цикловыми механизмами шагания (например, марсоход со схемой 2ЛШ разработки ВНИИтрансмаш, шагающая машина «Восьминог» (8Н2Ш) с механизмом шагания «λ-образного» типа ВолгГТУ) и многостепенные, использующие инсектоморфные ноги (робот-паук Asterisk, схема 6Н24Ш), копирующие походку млекопитающих (например, Little Dog, схема 4Н8Ш) или человекоподобные (андроидные роботы со схемами передвижения типа 2Н6Ш, 2Н10Ш).

Гибридные (комбинированные) схемы СШ являются результатом попыток совмещения достоинств различных механизмов передвижения. В первую очередь здесь следует упомянуть разработки колесно-шагающих механизмов.

К этому классу следует отнести «шагающие» (вернее, псевдошагающие) СШ, аналогичные примененной в роботе RHEX. Принцип передвижения этого робота (6РШ) основан на одноосевом вращении каждого из шести рычагов специальной конфигурации, поэтому такой способ передвижения условно можно отнести к шаганию «колесного» типа – рычаги легко могут быть заменены на колеса с превращением СШ в схему 6К. Испытания подобного робота показали хорошие результаты при передвижении в сложных условиях (трава, заросли, россыпи камней и т. п.). Интересной разработкой, которую также можно отнести к схемам с «колесным» шаганием, является двенадцатиколесный транспортный модуль «Торнадо» (НИИ СМ МГТУ имени Н.Э. Баумана, [8]), созданный по схеме типа «Пади-вагон» [9]. СШ этого типа условно можно получить путем замены каждого колеса в схеме 4К на колесные модули в виде треугольника, в вершинах которого располагается по отдельному колесу. Получается схема 12×4К4Ш, в которой помимо колесного режима движения возможен также колесно-шагающий режим, при котором приводятся во вращение не отдельные колеса, а трехколесные модули целиком.

Колесно-шагающие СШ могут быть как с одностепенными механизмами шагания (например, ХМ-4 [9] со схемой 6КШ), так и с многостепенными – как у робота Halluc II [5], шасси которого (8КУ×3Ш) имеет 40 (!) приводов (с учетом восьми мотор-колес).

Колесно-рычажные варианты СШ заключаются в добавлении к колесной схеме одного (робот Pointman со схемой 4К1ПРА) или нескольких рычагов (4КР2А), служащих опорами при преодолении значительных препятствий и/или обеспечивающих переворот шасси в случае опрокидывания.

Альтернативными вариантами развития гибридных схем являются упомянутое выше использование манипулятора в схемах 6К/М3А [10], 2Г/М2А, а также появление прыгающих роботов. Высокими адаптационными свойствами характеризуется гусенично-шагающий робот Titan X (Hirose Fukshima Robotics Lab, схема 4ГУН8А) с возможностью передвижения в двух режимах: гусеничном (4ГУА) и шагающем (4Н12Ш).

Особое место среди адаптивных РТС занимают разработки реконфигурируемых шасси, например, СШ, приведенная в [1], с тремя вариантами перенастройки (6Г2А, 4К и 4КР2А).

Перспективным направлением повышения адаптационных способностей шасси МР является создание сочлененных СШ, появившихся как результат простой сцепки однотипных колесных или гусеничных модулей (например, двухгусеничных в роботе Sand Dragon) и развивающихся в сторону создания многомодульных реконфигурируемых самоорганизующихся РТС [4].

Рассмотрены схемные и конструктивные решения, нашедшие применение при создании шасси наземных (напланетных) РТС. Проведен кинематический и структурный анализ большого числа схем шасси. Разработана *классификация* шасси, основанная на анализе их *адаптационных способностей*, а также предложены принципы и правила составления *оригинальной формуль-*

*ной записи* схемы шасси, служащей для краткого описания ее структурного состава. Использование таких формул удобно при упоминании рассматриваемой схемы шасси и при выполнении сравнительного анализа различных схемно-конструктивных решений.

Таблица 1

**Классификация колесных и гусеничных СШ**

| Колесные | | | |
|---|---|---|---|
| Критерий классификации | Описание | Формула | Примеры применения |
| По числу элементов движителя (колес, гусениц, ног, секций и т. п.) | С жесткой рамой (корпусом), 2-, 3-, 4-, 6-, 8-колесные, с неуправляемыми колесами (бортовым способом поворота) | 2К | ЗР1 и ЗР2 (ЦНИИ РТК), Recon Scout (Recon Robotics Inc.), SpyRobot MkI (Macroswiss) |
| | | 2К/S | RMP 200 (Segway Robotics) |
| | | 4К | «КОТ» (МГТУ имени Баумана), «Скарабей» (СЕТ-1), «Мангуст» [8], SpyRobot 4WD [2], Dragon Runner [2] |
| | | 6К | МРК «ТМ3» [8], РТК-04 [1], Scorpion (MacroUSA) |
| | | 8К | Rascal (Kentree) |
| По способу поворота (числу управляемых ЭД) | С управляемыми колесами (рулевыми механизмами или индивидуально) | 3КУ | Tri-Star I (Hirose Fukushima) |
| | | 4×2К1Ру | «Вездеход-РЦ» [7], X-Bot [2], TRP3 (OTO Melara) |
| | | 4КУ | LRMC (ВНИИтрансмаш) |
| | | 6КУ | XM-7 [9] |
| | С колесами типа Mecanum | 4О | youBot (KUKA), RMP50 Omni (Segway Robotics) |
| По адаптационным способностям (типу и числу элементов адаптации шасси) | Изменяемой геометрии с пассивными шарнирами излома рамы или поворота (перемещения) осей вращения колес (балансирных тележек) | 4К1П | XM-2 [9], LRV (ARA Inc.), Ratler (Sandia Labs) |
| | | 6К1П | Шестиколесная МТП [1] |
| | | 6К3П | ДР РХР (ЦНИИ РТК) |
| Гусеничные | | | |
| По числу ЭД (колес, гусениц, ног, секций и т. п.) | Фиксированной конфигурации с жесткой рамой (корпусом), 2-, 4-гусеничные с бортовым способом поворота | 2Г | РТК-07 (ЦНИИ РТК), «Варан» [8], Talon, MPRS/URBOT [7], Matilda (Mesa Associates) |
| По способу поворота (числу управляемых ЭД) | Изменяемой геометрии, с изгибом гусеничной ленты (поворот) | 1ГА | Aurora (Automatica Inc.) |
| По адаптационным способностям (типу и числу элементов адаптации шасси) | Изменяемой геометрии с пассивными или активными шарнирами излома рамы (корпуса) или поворота гусеничных тележек, с активными шарнирами поворота рычагов с гусеницами | 2Г1А | Wheelbarrow MK9 (Northrop Grumman), МРК-27 (СКТБ ПР), «Кобра-1600» [8] |
| | | | МРК-25, MicroVGTV (Inuktun) |
| | | | Viper [2] |
| | | 2ГА | МР на базе 2Г. СШ с ИГ (ВНИИтрансмаш) |
| | | 4Г8П | XM-3 [9] |
| | | 4Г1А | PackBot, SUGV [2], Negotiator (iRobot) |
| | | | Raposa (IdMind) |
| | | 4Г2А | МРК-26 (СКТБ ПР), Telemax, вариант (Telerob) |
| | | 6Г2А | СМР-01 [1] |

Таблица 2

**Классификация шагающих, гибридных и сочлененных СШ**

| Шагающие | | | |
|---|---|---|---|
| Критерий классификации | Описание | Формула | Примеры применения |
| По типу механизма шагания, числу элементов движителя и числу активных степеней подвижности | Шагающие с опорными элементами в виде «лыж» с цикловыми механизмами | 2ЛШ | «Лыжно-шагающий» марсоход [9] |
| | | 8Н2Ш | «Восьминог» (ВолгГТУ) |
| | Шагающие с опорными элементами в виде «ног» (подобные ногам животных, инсектоморфные или человекоподобные) | 4НШ | Cheetach (Boston Dynamics) |
| | | 4Н8Ш | Little Dog (Boston Dynamics) |
| | | 6Н18Ш | НМША (ИПМ Келдыша), МАША (Ин-т механики МГУ) |
| | | 6Н24Ш | Asterisk (Osaka Univer.) |
| Гибридные (комбинированные) | | | |
| По типу адаптационного механизма, числу элементов движителей (колес, гусениц, ног, секций и т. п.) и числу активных степеней подвижности | Шагающие с «колесным» принципом шагания (одноосевое вращение каждого из элементов), с рычагами | 4РШ | Whegs (Case West. Reserve Univer.) |
| | | 6РШ | RHEX (Boston Dynamics) |
| | То же, с колесными модулями | 12х4К4Ш | МРК «Вепрь», ТМ «Торнадо» [8] |
| | Колесно-шагающие с рычажными механизмами шагания или типа «ломающаяся рама» (безотрывный способ шагания) | 6КШ | Колесно-шагающий робот ХМ-4 (прямило П.Л. Чебышева) [9] |
| | | 6К1А | «Транспортный модуль» [6] |
| | Колесно-шагающие с многостепенными механизмами шагания | 4КУШ | Hylos (Paris Univer.) |
| | | 8КУ24Ш | Halluc II [5] |
| | Колесно-гусеничные с поворотными гусеничными секциями | 4КГ2А | Telemax, вариант (Telerob) |
| | | 4К6Г2А | Andros F6A, вариант (Northrop Grumman) |
| | | 6К4Г2А | «ТС с активными приводными тележками» [7] |
| | Колесно-рычажные со специальными поворотными рычагами | 4К1ПРА | Pointman (ARA Inc.), ЛРР (МГТУ имени Баумана) |
| | | 4КР2А | «Колесно-рычажный вариант МТП» [1] |
| | То же, с добавлением механизма прыгания | 4К2Р1АПр | Sand Flea (Boston Dynamics) |
| | Гусенично-шагающие | 4ГА | Chaos (Autonomous Solutions Inc) |
| | | 6Г4А | Hibiscus (Чибский технологический институт) |
| | | 4ГУН8А | Titan X (Hirose) |
| | Колесные или гусеничные с использованием исполнительного оборудования в качестве механизма адаптации шасси | 6К/М3А | Мобильный робот по [10] |
| | | 2Г/М2А | Hibrid mobile robot, Pat. US 7874386 |
| Сочлененные | | | |
| По числу секций, числу элементов движителя и числу активных степеней подвижности отдельной секции | С пассивными шарнирами сочленения с колесным или гусеничным движителем секций | 2С1Пх2Г | Sand Dragon (Sandia Labs) |
| | | 3С2Пх2К | RobuROC 6 (Robosoft SA) |
| | | мС2Пх2К | «Робопоезд» (ЦНИИ РТК) |
| | С активными шарнирами сочленения с колесным или гусеничным движителем секций | 3С1Ах2Г | FootBot [4] |
| | | 3Сх2К/5А | Марсоход с цилиндро-коническими колесами (ХМ-8) [9] |
| | | 3Сх2КУ/5А2П | IARES-L (ВНИИтрансмаш) |
| | Многомодульные ползающие | 15С2А | «ЗМЕЕЛОК-2» (ЦНИИ РТК) |
| | | 9С2Ах6Кп | ACM-R5 (Hirose) [4] |
| | Многомодульные реконфигурируемые (самоорганизующиеся) | мР1А, мР2А, мР3А | Poly Bot [4], M-TRAN III [4], SuperBot (Univ. of S.California) |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, А.В.** Малогабаритный реконфигурируемый мобильный робот [Текст] / А.В. Васильев // Перспективные системы и задачи управления: Матер. VII Всерос. науч.-практи. конф. –Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. –С. 61–71.

2. **Васильев, А.В.** Современное состояние и общие тенденции развития мобильных малоразмерных робототехнических комплексов специального назначения [Текст] / А.В. Васильев // Экстремальная робототехника: Труды XXI Междунар. науч.-техн. конф. –СПб.: Политехника-сервис, 2010. –С. 97–103.

3. **Вонг, Дж.** Теория наземных транспортных средств [Текст] / Дж. Вонг; Пер. с англ. –М.: Машиностроение, 1982. –213 с.

4. **Иванов, А.В.** Мини- и микроробототехника: Учеб. пособие [Текст] / А.В. Иванов, Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. –2011. –96 с.

5. **Карелин, В.** Бот Halluc II ходит на колесах и ездит на ногах [Электронный ресурс] / В. Карелин // Научно-популярный журнал «Мембрана». –Режим доступа: http://www.membrana.ru/particle/3212 (Дата обращения 01.06.2012)

6. **Кизоркин, А.С.** Алгоритм управления транспортной системой робота на основании показаний внутренних датчиков приводов [Текст] / А.С. Кизоркин // Экстремальная робототехника: Сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. –СПб.: Политехника-сервис, 2011. –С. 207–210.

7. **Космачёв, П.В.** Анализ конструктивных схем движителей транспортных средств робототехнических комплексов для выполнения антитеррористических операций [Текст] / П.В. Космачёв // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды IX Всерос. науч.-практич. конф. –СПб.: НПО Специальных материалов, 2006. –Т. 5: Экстремальная робототехника. –С. 607–615.

8. Отдел СМ4-6. Специальные мехатронные и робототехнические устройства [Электронный ресурс] / Сайт НИИ НУК СМ МГТУ имени Н.Э. Баумана. –Режим доступа: http://niism.bmstu.ru/otdelyi-nii-sm/sm4-6 (Дата обращения 01.06.2012)

9. **Кемурджиан, А.Л.** Планетоходы [Текст] / А.Л. Кемурджиан, В.В. Громов [и др.]; Под ред. А.Л. Кемурджиана. –2-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1993. –400 с.

10. **Шинов, С.Н.** Использование манипулятора мобильной робототехнической системы для преодоления препятствий [Текст] / С.Н. Шинов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды X Всерос. науч.-практич. конф. –СПб.: НПО Специальных материалов, 2007. –Т. 5: Экстремальная робототехника. –С. 194–201.

УДК 621.865:004.896

*А.А. Иванов, О.А. Шмаков, Д.А. Демидов*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗМЕЕВИДНОГО РОБОТА «ЗМЕЕЛОК-3»

*A.A. Ivanov, O.A. Shmakov, D.A. Demidov*
*St.-Petersburg, Russia*

# AN EXPERIMENTAL STUDY OF SNAKE ROBOT «ZMEELOC-3»

Приведено описание конструкции и программно-аппаратных решений змеевидного робота с универсальными шарнирами-модулями, обладающими повышенными силомоментными характеристиками и подвижностью. Представлены результаты испытаний комплекса при выполнении различных локомоционных мод.

ЗМЕЕВИДНЫЙ РОБОТ. МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ-ШАРНИР. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.

A description of the design, software and hardware solutions of the new development authors snake robot with an enhanced torque and a mobility universal joints are presented. The results of the test set for the various modes of locomotion are discussed.

SNAKE ROBOT. MECHATRONIC JOINT. THE SOFTWARE ROBOT CONTROL. EXPERIMENTAL STUDY.

Работы по созданию змеевидных роботов S. Hirose в 70-х гг. XX века [1], а также теоретические публикации [2, 3] по алгоритмам управления гиперизбыточными манипуляторами послужили основой для формирования отдельного направления в робототехнике – гиперизбыточные модульные змеевидные мобильные роботы-манипуляторы (ЗР). Развитие технологий изготовления сложных корпусных деталей и появление на рынке эффективных малогабаритных электроприводов позволяют рассматривать возможность создания опытных образцов змеевидных роботов специального применения. Оптимизация конструкции, архитектуры программно-аппаратного обеспечения системы управления и разработка новых алгоритмов для реализации локомоционных мод и манипуляций ЗР являются задачами, актуальность решения которых подтверждается возрастающим потоком публикаций [4].

В период с 2003 по 2011 г. мы получили самостоятельные результаты по алгоритмам планирования и управления локомоциями змеевидных роботов и на основе этих результатов разработали ряд действующих макетов змеевидных роботов. В работе [5] представлен анализ современных мировых достижений в области разработки змеевидных роботов и подробно описаны результаты, полученные нами на макетах змеевидных роботов «ЗМЕЕЛОК-1», «ЗМЕЕЛОК-2», а также рассмотрен гиперизбыточный манипулятор, модульная конструкция которого использует принципы, заложенные в конструкции змеевидных роботов.

В настоящей статье представлен результат нашей новой разработки: макет змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3», обладающий повышенными силомоментными характеристиками, имеющий более тщательно проработанную конструкцию шарнира и несущего корпуса, обоснованную в работе [6]. Результаты экспериментов подтверждают эффективность конструктивных и аппаратно-программных решений, обеспечивающих скоростные и силовые характеристики на уровне достижений лидирующих разработчиков змеевидных роботов.

## Особенности конструкции и аппаратных решений змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3»

Одним из аргументов, выдвигаемым при обосновании реализации змеевидного робота, является возможность создания на основе уни-

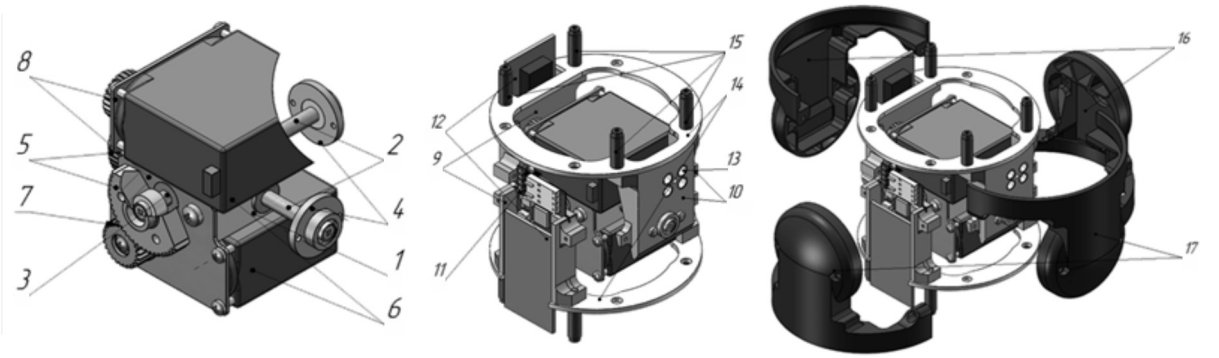



Рис. 1. Корпус шарнира и корпус с установленными кронштейнами с фланцами

фицированного мехатронного модуля-шарнира механической структуры, способной осуществлять локомоции и манипуляции. Качество конструкции шарнира является фактором, определяющим скоростные, адаптивные и силовые характеристики змеевидного робота. Относительная простота реализации змеевидного робота на основе одностепенных модулей, объединяемых в последовательную цепь с чередованием относительной ориентации осей жестко связанных модулей разворотом на прямой угол, приводит к усложнению алгоритмов реализации даже простейших локомоционных мод и повышает требования к силомоментным характеристикам сервоприводов [6]. Конструкция мехатронного модуля с двухстепенным универсальным шарниром, обеспечивающим качание в перпендикулярных плоскостях, позволяет строить форму пространственной скелетной ломаной из отрезков постоянной длины и наиболее просто аппроксимировать гладкие кривые локомоционных мод и формы при манипуляциях.

Конструкция модуля представляет собой двухстепенной активный шарнир с пересекающимися взаимно перпендикулярными осями, находящимися в одной плоскости. Конструктивно корпус шарнира состоит из основания 1 с зафиксированными на нем полуосями шарнира 2, 3 (рис. 1). На полуосях 2 через шарикоподшипники крепятся втулки пассивных вилок 4, на полуосях 3 крепятся приводные шестерни активных вилок 5. Вращение приводного зубчатого колеса активных вилок осуществляется серводвигателем Hitech 7940TH поз. 6 через редуктор 1:2 поз. 7. Для точного соблюдения межосевого расстояния редуктора, сервопривод и оси базируются посадочными шейками на редукторных пластинах 8.

Активные 9 и пассивные 10 вилки крепятся к выходным зубчатым колесам 5 и втулкам 4. На активных вилках модуля расположены плата управления 11 и питания 12 соответствующей степени шарнира. На пассивных вилках модуля установлены клеммы 13 для коммутации проводов питания и разъем для соединения проводов управления, проходящих транзитно с одной пассивной вилки на другую. Активная 9 и пассивная 10 вилки соответствующих полуосей модуля присоединяются к фланцу поз. 14 стойками поз. 15. При сборке нескольких модулей совместно, стойки 15 одного модуля устанавливаются в посадочные отверстия фланца 14 другого модуля и фиксируются винтами. Клеммы и разъемы пассивных вилок соединяются проводами. На собранный каркас устанавливаются защитные кожухи поз. 16, 17, выполняющие функции опорных корпусов при реализации движений по опорным поверхностям.

Конструктивные элементы модулей ЗР представлены деталями, для изготовления которых использовались традиционные технологии механообработки: фрезерное и токарное оборудование, а также деталями, имеющими пластинчатую форму. Для изготовления соединительных фланцев и редукторных пластин использовалась лазерная резка с последующей обработкой. На левой стороне рис. 2 приведена фотография макета змеевидного гиперизбыточного робота без установленных кожухов.

Для изготовления кожухов применена технология быстрого прототипирования. Мастер-модели кожухов изготовлены на оборудовании ЦНИИ РТК – 3D принтере ObjetEDEN 250. По мастер-моделям изготавливались силиконовые формы, а затем из резиноподобного полиуретана PX761 в силиконовой форме отливались кожухи.

Рис. 2. Фотографии макета змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3» без кожухов (слева) и с кожухами (справа)

На рис. 2 справа представлена фотография макета гиперизбыточного робота с установленными кожухами, предотвращающими повреждения электронных узлов макета и обеспечивающими формирование опорных контактных зон на поверхности перемещения.

В табл. 1 приведены технические характеристики действующего макета ЗР «ЗМЕЕЛОК-3».

Функционирование каждого из двух сервоприводов, входящих в состав мехатронного модуля с ортогональными осями, обеспечивает отдельный комплект блоков: вторичный источник питания, преобразующий напряжение питания от внешнего источника, сервопривод и плата управления на базе микроконтроллера Atmel ATmega8a. Программное обеспечение (ПО) микроконтроллера осуществляет позиционное управление сервоприводом по командам с компьютера верхнего контура управления ЗР и поддержку полудуплексного обмена данными.

**Архитектура программного обеспечения нижнего и верхнего контуров управления**

Встроенное ПО блока управления сервоприводом вращения оси мехатронного модуля выполняет функции инициализации микроконтроллеров после подачи напряжения питания от внешнего источника и обработки поступающих по интерфейсу RS485 команд задания, запроса считывания и передачи значения угла поворота выходного вала сервопривода относительно нейтрального положения. Начальные нейтральные положения осей сервоприводов задаются на этапе сборки модулей с помощью программатора 6HPP-21 Plus. На собранном и выложенном на плоскую поверхность макете ЗР по информации с

Таблица 1

**Технические характеристики ЗР «ЗМЕЕЛОК-3»**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Количество модулей, шт | 2–15 |
| Масса модуля, кг | 0,35 |
| Масса, кг | 0,7–5,25 |
| Длина модуля, мм | 80 |
| Диаметр, мм | 80 |
| Максимальный момент на каждой оси модуля, кН*мм | 3,2 |
| Количество сервоприводов, шт. | 4–30 |
| Напряжение питания, В | 40 |
| Связь с ПК | USB |
| Электропитание | Внешний источник |

датчиков обратной связи абсолютного положения проводятся корректировка значений кодов нейтрального положения и запись их в таблицу корректировки углов верхнего контура управления.

Каждый микроконтроллер в цепи содержит уникальный идентификатор, определяющий положение модуля в последовательной цепи. Идентификатор присваивается при первоначальном программировании микроконтроллера в соответствии с порядком следования его в цепи модулей. При получении команды изменения положения выходного вала сервопривода микроконтроллер выбирает из поля данных данные в соответствии со своим уникальным идентификатором. Согласно полученным данным микроконтроллер вырабатывает управляющий временной импульс для сервопривода.

Получение информации об истинном положении выходных валов сервоприводов осуществляется с использованием одного из двух алгоритмов. Первый алгоритм заключается в поочередном запросе к каждому звену цепи и получении от него информации о положении сервопривода. Второй алгоритм состоит в «лавинном» получении информации. Выбирается звено, с которого необходимо начать получение значений углов поворота сервоприводов, и отправляется сообщение группового запроса со специальным идентификатором. Все микроконтроллеры подключены к общей шине данных. Каждый из них имеет возможность отслеживать поступление запроса и окончание выполнения ответа микроконтроллером, номер которого на единицу отличается от собственного номера микроконтроллера. При поступлении группового запроса все микроконтроллеры выполняют определение текущего положения выходного вала. Однако отправку информации осуществляет только микроконтроллер с указанным идентификатором. После отправки с предыдущего контроллера данных обратной связи звено с идентификатором, отличающимся на единицу, автоматически без получения повторного запроса передает данные о состоянии своего сервопривода. Процесс прекращается по достижении максимального номера.

Для реализации локомоционных и манипуляционных функций гиперизбыточных роботов используются разработанные ранее [7] алгоритмы, использующие аналитические зависимости и вербальные правила. Для управления моделью гиперизбыточного робота разработано ПО, реализующее эти алгоритмы управления. Основной задачей программного обеспечения верхнего контура управления является формирование управляющих команд, позволяющих формировать локомоционные моды движения, управление целенаправленным движением ЗР и манипуляциями модулей, из которых состоит робот. Двухсторонний информационный и управляющий обмен ПО верхнего контура управления со змеевидным роботом осуществляется через переходник USB-RS485. Программное обеспечение верхнего контура управления реализовано на ПК с ОС WINDOWS-7 и реализует функции интерфейса пользователя для задания режимов движения, выбора локомоционных мод, выполнения манипуляционных операций и составных во времени движений. Алгоритмы планирования движений реализованы в программе верхнего контура управления.

Программное обеспечение верхнего контура управления состоит из трех основных уровней: уровня взаимодействия с оператором (UI), основного уровня (MAIN) и уровня работы с устройствами ввода/вывода ПК (I/O). Уровень взаимодействия с оператором отвечает за взаимодействие с оператором через графический оконный интерфейс и получение управляющих команд с джойстика. Основной уровень отвечает за обработку данных, полученных с уровня взаимодействия с оператором, формирование на их основе управляющих пакетов, отправляемых на устройства ввода/вывода (третий уровень), за обработку данных, полученных с устройств ввода/вывода, реагирование на них, формирование на их основе информационных пакетов, передаваемых первому уровню для отображения. Уровень работы с устройствами ввода/вывода отвечает за прием/передачу сформированных пакетов на виртуальные последовательные порты персонального компьютера и прием данных о положении рычага джойстика и кнопок.

Основное взаимодействие с оператором осуществляется через оконный интерфейс. Оконный интерфейс программы состоит из одного основного окна и трех дочерних окон, которые запускаются из него: основное окно, окно отображения формируемых абсолютных, относительных углов всех волн (главной и встречной), окно терминала входящей и исходящей информации с виртуального последовательного порта ПК.

Основное окно служит для ввода параметров

локомоционных мод, выбора параметров из пополняемого списка, отображения текущих параметров волн, настроек виртуального последовательного порта ПК, задания манипуляционных движений модулей, выбора настроек для выполнения типовых мод.

В основном окне на главной панели управления параметрами оператор может ввести или выбрать из имеющихся параметры локомоционных мод движения. На главной панели управления расположены кнопки запуска/останова формирования управляющих команд в цикле и пошаговом режиме, кнопка сбора параметров, кнопка обнуления текущего времени с выпадающим меню управления временем (изменение направления счета времени, шаг дискретизации времени, изменение текущего времени просчета параметров), кнопка обнуления параметров. Вспомогательная панель – это динамическая панель, которая изменяет свое назначение в зависимости от способа формирования локомоционных мод и управляющих команд, также может служить для расширенного отображения и ввода всех параметров программы, кроме того, в этой части окна идет отображение информации с бортовой видеокамеры робота. Изменение назначения осуществляется с помощью кнопок на панели управления программой. На основной информационной панели всегда отображаются текущее время робота и текущее время компьютера, состояние последовательного порта ПК, с которым происходит информационный обмен, статус программы, т. е. отображение последней выполненной операции. При попытке выполнения некорректных действий текст сообщения об ошибке и рекомендации по ее исправлению выводится на экране. Например, при попытке отправки данных на неинициализированный последовательный порт ПК выдается сообщение о необходимости открыть порт.

Окна визуализации локомоционных мод, отображения формируемых абсолютных и относительных углов для всех типов волн, а также окно терминала входящей и исходящей информации с последовательного порта ПК являются информационными и необходимы при отладке.

Окно списка операций предназначено для выбора типовых мод и их выстраивания для последовательного выполнения, в т. ч. и реализации алгоритма планирования движения по заданной траектории и манипуляций при осмотре местности.

**Результаты экспериментальных исследований**

Модель гиперизбыточного робота прошла исследовательские испытания, в ходе которых проверены силомоментные, скоростные и энергетические характеристики. Определены отличия реализованных характеристик от заявляемых производителем сервоприводов. Определены режимы безопасного использования устройства. Момент, развиваемый сервоприводом, обеспечивает статическое консольное удержание в поле силы тяжести цепи из пяти модулей.

После сборки и отладки модели были проведены экспериментальные исследования алгоритмов управления. На рис. 3 представлены покадровые развертки видеорегистрации движения ЗР для частоты изгибных колебаний 1 Гц в различных модах: «прямой ход», «боковой ход», а также энергетически эффективная мода «качение». Все моды формируются сложением волн изгибания в ортогональных плоскостях и характеризуются амплитудой угла отклонения от прямолинейной формы касательной к проекции скелетной кривой на соответствующую плоскость.

Локомоционная мода «прямой ход» формируется сложением двух ортогональных бегущих волн [7] с соотношением периодов 1:2. На рис. 3 *а* представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 3 с при реализации моды с амплитудами горизонтальной волны 15 градусов, вертикальной 5 градусов. Ракурс съемки не позволяет правильно оценить пройденное расстояние, которое составило 2 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,074 м/с.

Локомоционная мода «боковой ход» формируется сложением двух ортогональных бегущих волн [7] одинакового периода с относительным фазовым сдвигом на четверть периода. На рис. 3 *б* представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 2,5 с при реализации моды с амплитудами горизонтальной волны 15 градусов, вертикальной 5 градусов. Пройденное расстояние 3 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,13 м/с.

Локомоционная мода «качение» («спин») формируется сложением двух ортогональных стоячих волн [7] со сдвигом во временной области на четверть периода. На рис. 3 *в* представлены начальное и конечное положение ЗР в покое и последовательные кадры с шагом 2 с при реа-

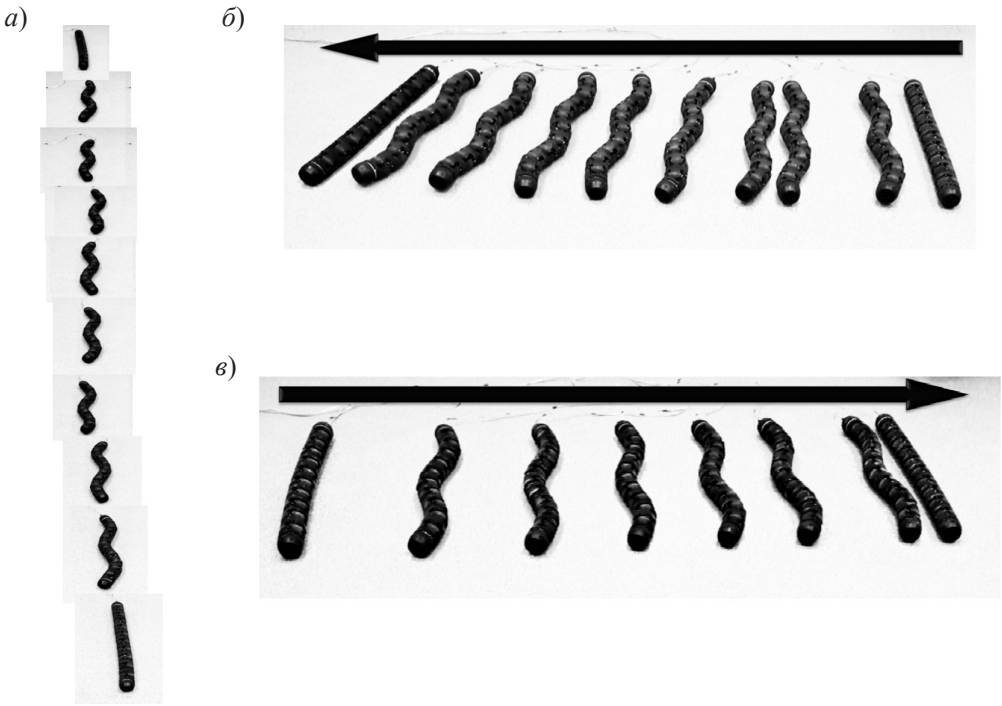



Рис. 3. Последовательные фазы движения ЗР при реализации локомоционных мод:
*а* – «прямой ход»; *б* – «боковой ход»; *в* – «качение»

лизации моды с амплитудами горизонтальной и вертикальной волн 15 градусов. Пройденное расстояние 3 м. Средняя скорость перемещения ЗР составляет 0,21 м/с.

Максимально достигнутые в экспериментах значения скоростей перемещения ЗР в модах «прямой ход» и «боковой ход» при амплитудах горизонтальных волн 40 градусов и частоте колебаний 1 Гц приведены в табл. 2. Там же для сравнения представлены результаты, достигнутые при схожих параметрах в моделях предыдущих конструкций.

Благодаря принятым мерам по уплотнению компоновки модуля на основе рекомендаций по конструктивному обоснованию [6], габаритные размеры модулей не превосходят соответствующие размеры прежних моделей. Обновленное ПО системы управления позволяет выполнять движения в большинстве известных мод, синхронизировать временные интервалы приема/передачи данных, минимизируя рассогласование астрономического времени и времени операционной системы.

Результаты экспериментов показывают, что разработанная модель змеевидного робота «ЗМЕЕЛОК-3» имеет существенно лучшие силомоментные и скоростные показатели по сравнению с ранними версиями. Однако повышенное энергопотребление для их реализации делает невозможным реализацию автономного по питанию ЗР с достигнутыми показателями. Модель используется для отработки новых режимов движения и алгоритмов управления с целью выработки правильных конструктивных и программно-аппаратных решений при создании специальных мобильных роботов змеевидного типа.

Работа выполнена в рамках тематического плана ЦНИИ РТК в 2011 г. и в рамках государственного задания ЦНИИ РТК в 2012 г.

Таблица 2

**Скорости перемещения ЗР**

| Мода | «ЗМЕЕЛОК-1» | «ЗМЕЕЛОК-2» | «ЗМЕЕЛОК-3» |
|---|---|---|---|
| Прямой ход, см/с | 2,3 | 10 | 20 |
| Боковой ход, см/с | 8 | 20 | 40 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hirose, S.** Biologically Inspired Robots: Snake-like Locomotors and Manipulators [Text] / S. Hirose. –UK: Oxford University Press, 1993 (translation of 1987 Japanese ed.).

2. **Chirikjian, G.S.** A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics [Text] / G.S. Chirikjian, J.W. Burdick // Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Jun 1994. –Vol. 10. –Iss. 3. –P. 343–354.

3. **Ben Brown, H.** Design and Control of a Second-Generation Hyper-Redundant Mechanicscs [Электронный ресурс] / Brown Ben H., M. Schwerin, E. Shammas // In Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. –San Diego, CA, USA. –Oct. 29-Nov. 2, 2007. –P. 2603–2608.

4. 2012 IEEE International Conf. on Robotics and Automation River Centre [Электронный ресурс]. –Saint Paul, Minnesota, USA. –May 14-18, 2012.

5. **Иванов, А.А.** Мобильные змеевидные роботы: теория и практика [Текст] / А.А. Иванов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков // Машиностроение. Спецвыпуск Специальная робототехника и мехатроника. –М., 2011. –С. 32–41.

6. **Иванов, А.А.** Анализ конструктивных компоновок двухстепенного мехатронного модуля для змеевидного робота [Текст] / А.А. Иванов //Междунар. науч.-технич. конф. Экстремальная робототехника 23-25 ноября 2011. –СПб., 2011. –С. 104–110.

7. **Иванов, А.А.** Синтез локомоционных мод змеевидного робота на основе сложения бегущих волн [Текст] / А.А. Иванов, Д.А. Демидов, О.А. Шмаков // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника. Тр. XI Всерос. науч.-практич. конф. – СПб.: НПО специальных материалов, 2008. –Т. 5. –С. 297–303.

УДК 62-791.2

*Б.А. Рабинович, Е.И. Юревич*
*Санкт-Петербург, Россия*

# СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕД НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

*B.A. Rabinovich, E.I. Yurevich*
*St.-Petersburg, Russia*

# SYSTEMS FOR MEASUREMENT AND CONTROL OF GASEOUS AND LIQUID MEDIA PARAMETERS ON BOARD OF SPACE VEHICLES

Изучены способы измерения параметров газообразных и жидких сред и реализующие их системы.
ДАВЛЕНИЕ. ПЛОТНОСТЬ. ВОЗДУШНЫЕ ПАРАМЕТРЫ.

The paper is to show methods of measuring gaseous and liquid media parameters and to consider systems for their realization.
PRESSURE. DENSITY. AIR-DATA PARAMETERS.

Задачами измерения и контроля газовых сред внутри и снаружи космических аппаратов, а затем и других летательных аппаратов, в ЦНИИ РТК начали заниматься еще в 70-х гг. XX века в период интенсивного развития космической техники [1].

Первые исследования и разработки относились к методам управления и контроля жизнеобеспечения обитаемых космических аппаратов. После аналитических исследований и математического моделирования были разработаны методы оптимизации режимов работы систем обеспечения газового состава для обитаемых космических аппаратов, реализованные в трехкомпонентном газоанализаторе «Агат» (основные разработчики В.И. Красов, Л.В. Малейко). Помимо своего прямого назначения он сразу же нашел применение в метрополитене, шахтах, спортивных закрытых помещениях и т. п.

После этого по предложению НПО (теперь РКК) «Энергия» была сформулирована следующая тематика дальнейших работ в данном направлении, которая на многие годы определила ее для нашей организации:

разработка приборов контроля параметров атмосферы космических аппаратов;

создание приборов контроля герметичности летательных аппаратов;

разработка датчиков и сигнализаторов давления для экипажей космических аппаратов;

измерение параметров среды вокруг космических аппаратов на орбите и при спуске.

Однако одной из первых задач, относящихся к этому направлению, неожиданно стало создание параметрических высотомеров, действующих в функции не давления воздуха, как применяемые сегодня баровысотомеры, а плотности. Они потребовались прежде всего для выпуска парашюта при спуске с орбиты как более соответствующие физическому принципу действия парашюта.

Были проведены соответствующие исследования и создан принципиально новый тип параметрических высотомеров типа «Альфа» требуемого принципа действия, показанный на рис. 1 (А.А. Оганесян, О.А. Загашев, М.К. Запольнов, А.С. Звягинцев, Э.И. Марченко). Они выгодно отличаются от барометрических высотомеров отсутствием подвижных частей, быстродействием и большим диапазоном измеряемых высот вплоть до орбитальных [2].

В дальнейшем создали не имеющие аналогов параметрические высотомеры типа «Рябина», «Акация», измеряющие плотность атмос-

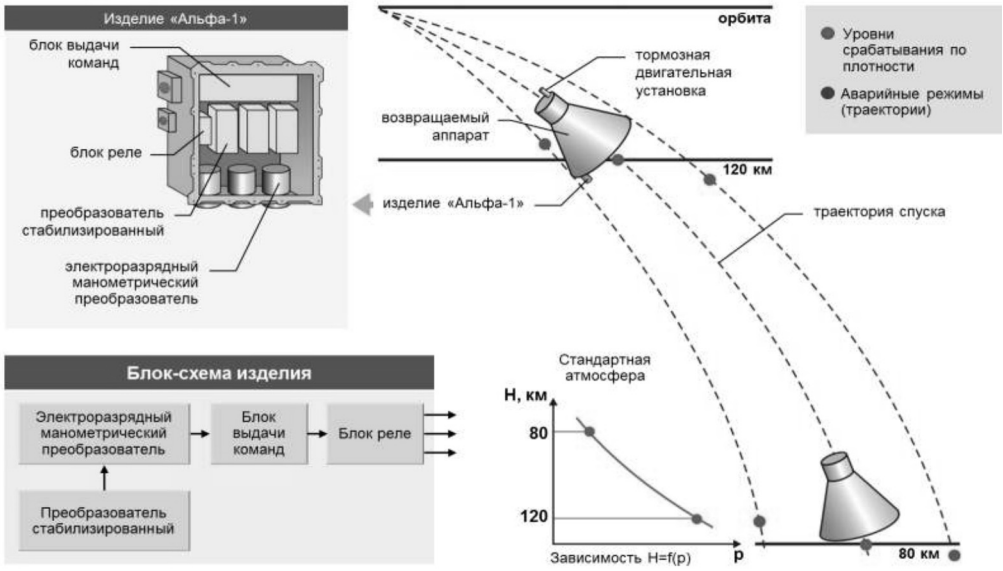



Рис. 1. Система «Альфа-1М» параметрического измерения высоты спускаемого с орбиты аппарата для управления спуском:
1 – орбита; 2 – тормозная двигательная установка; 3 – возвращаемый аппарат; 4 – прибор «Альфа-1М»; 5 – траектория спуска

феры за возмущенным поверхностным слоем, возникающим снаружи летательных объектов, двигающихся со сверхзвуковыми скоростями. Такие высотомеры основаны на использовании фотонного (рентгеновского и гамма-лучевого) излучения (В.Н. Барковский, В.Г. Микуцкий, М.С. Ольков).

На базе этих высотомеров созданы уникальные системы измерения воздушных параметров летательных аппаратов, включая воздушную скорость, углы ориентации относительно набегающего воздушного потока, лобовой воздушный напор. Эти параметры измеряются через возмущенный слой и обшивку летательного аппарата.

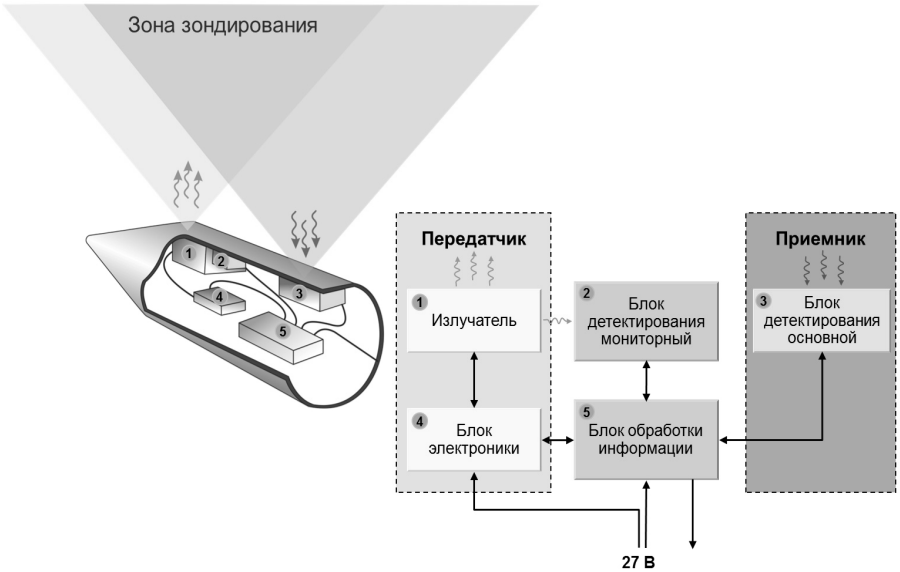



Рис. 2. Система «Акация» дистанционного измерения воздушных параметров через возмущенный слой атмосферы

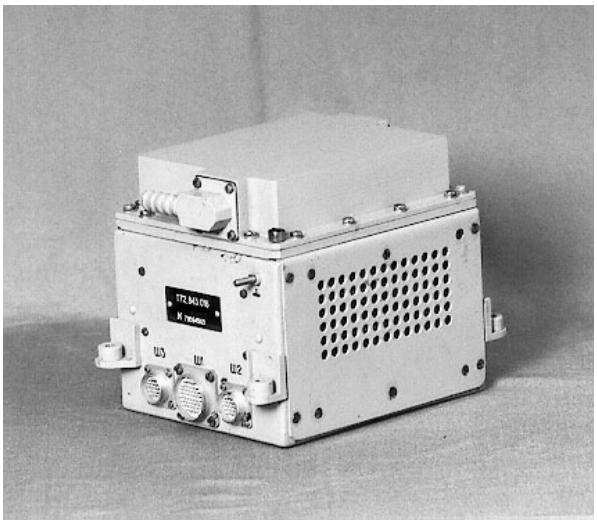


Рис. 3. Изделие «Камера»

В космонавтике это позволяет при сходе аппарата с орбиты управлять траекторией спуска путем использования его аэродинамических качеств (рис. 2) [1].

Из перечисленного выше наибольшее развитие получили системы контроля герметичности, особенно после гибели в июне 1971 г. космонавтов Г. Добровольского, В. Волкова и В. Пацаева из-за разгерметизации спускаемого аппарата. На корабли «Союз» была поставлена срочно разработанная система контроля герметичности Дюза, а в состав орбитальных космических станций типа «Мир» введен сигнализатор давления ДСД (В.А. Красов, Б.А. Ксенофонтов, В.А. Корольков, В.А. Маглыш, Л.В. Малейко). С тех пор подобные приборы входят в состав кораблей типа «Союз» и орбитальных станций, включая современную МКС.

Дальнейшим развитием этой тематики стало создание нового типа систем контроля герметичности «Аргус» и «Камера» для космических аппаратов «Союз-ТМ» и «Прогресс-М» (рис. 3). На их основе позднее создали новое поколение параметрических высотомеров (Л.А. Донской, В.П. Пылев, Б.А. Рабинович, В.В. Сергеев).

Развитием систем контроля герметичности стала выдача на пульт экипажа значений утечек и расчетной величины резервного времени, а также разработка способов и систем обнаружения мест разгерметизации космических аппаратов внутри и снаружи.

Уникальная чувствительность созданных систем контроля герметичности неожиданно привела к их применению и при наземных испытаниях герметичности различных объектов вместо традиционных барокамер. Барометрические методы требуют больших вакуумных камер, длительной подготовки, а применяемые при этом гелий и другие газы вредно влияют на испытываемые объекты. Разработанные в ЦНИИ РТК принципиально новые методы свободны от этих недостатков.

Для этой цели разработали новый пьезорезонансный датчик «Кварц» (рис. 4), измеряющий давление и температуру, что в совокупности позволяет давать количественную оценку герметичности (Т.П. Андронова, Л.В. Малейко, А.П. Минаков). На основе этого датчика разработали комплекс «Паскаль» контроля герметичности и поиска мест возможной течи с расчетом величины утечки. Комплекс применяется, в частности, для контроля герметичности контейнеров с радиоактивными отходами, контроля давления в отсеках подводных лодок и других газонаполненных объектов.

Последняя указанная выше тематика в области космонавтики – измерение внешней атмосферы вокруг космических аппаратов на орбите включает две задачи: измерение параметров собственной внешней атмосферы и параметров набегающего потока. Первую задачу решили созданием магниторазрядного измерителя разряженной газовой среды, на основе которого создали комплексы ДВЛС и «Индикатор», много лет успешно работающие на различных отечественных космических аппаратах и станциях (В.Н. Гадион, Е.Г. Гужва, Л.А. Донской).

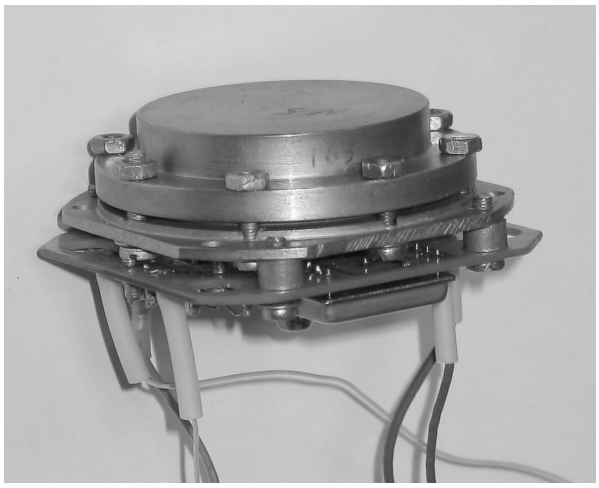


Рис. 4. Датчик герметичности «Кварц»

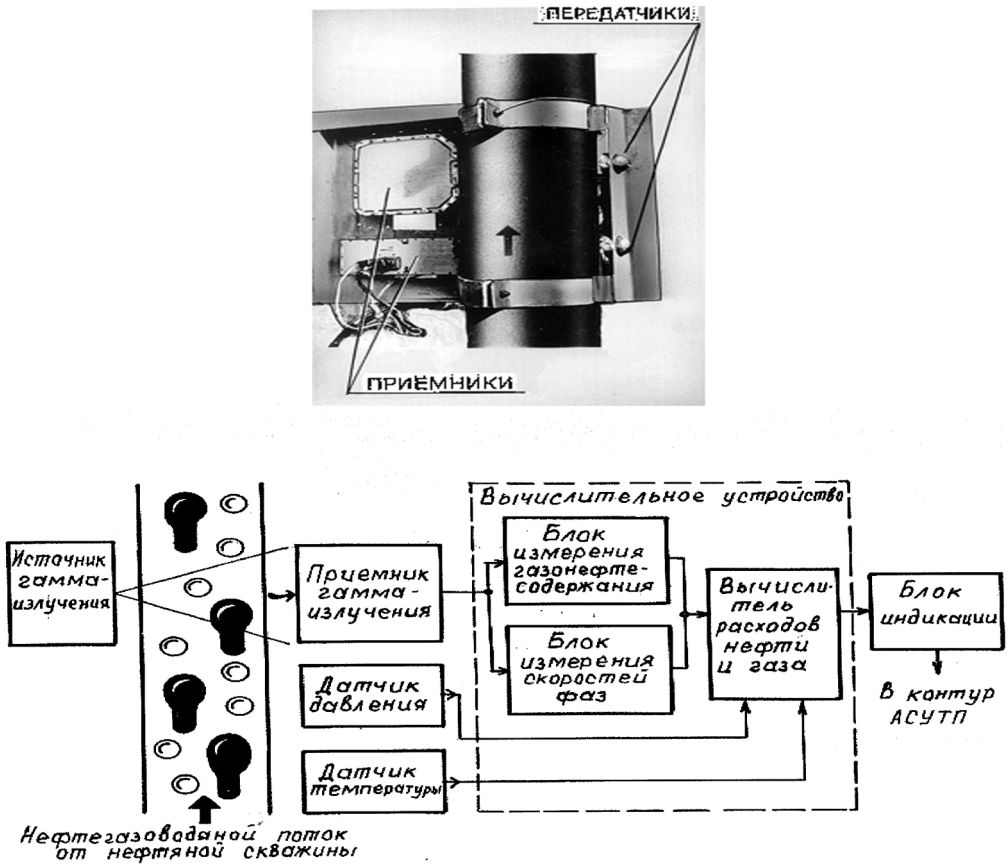



Рис. 5. Система измерения массового расхода нефти «Пульсар»

Задача измерения набегающего потока с целью парирования этого возмущения для стабилизации траектории аппаратов на орбите была решена с помощью того же магниторазрядного датчика системой ДВЛС (Е.Г. Гужва, Ю.Н. Крот, Л.А. Донской, Г.А. Себякина), разработанной для корабля «Буран» и экспериментально отработанной на ряде космических станций.

Отдельное направление работ ЦНИИ РТК составляют основанные на использовании фотонного излучения системы измерения количества (массы) и массового расхода жидких и газообразных сред. Они явились альтернативой повсеместно применяемым традиционным измерителям объема и объемного расхода жидкостей и газов и в отличие от них более соответствуют существу решаемых задач.

Первая такая задача на государственном уровне была поставлена как задание разобраться в причине расхождения показаний количества нефти, поставляемой нефтяниками за границу и регистрируемой там. Задачу решили путем создания уникальной системы измерения массового расхода нефти (типа «Пульсар») вместо объемного, с выделением при этом различных примесей (вода, газы и т. д.) (А.Н. Казаков, В.А. Кратиров, Е.Ю. Смирнова), показанной на рис. 5.

До этого близкие задачи решались для отдельных главных конструкторов в виде контроля расхода компонентов топлива в ракетах, как, например, система «Иней» для КБ «Южное».

Задача измерения массового количества топлива в баках оказалась чрезвычайно актуальной не только для ракетно-космических объектов, но и для авиации. В 80-х гг. XX века были разработаны первые такие системы типа «Уровень» (Ю.А. Бессонов, Г.К. Верещагин, А.Л. Минков). К сожалению, распад СССР не позволил полностью реализовать эти уникальные разработки.

Рассмотренные разработки ЦНИИ РТК, уникальные по принципу действия и характеристикам, в значительной части еще ждут своего развития и реализации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юревич, Е.И.** ЦНИИ РТК. История создания и развития [Текст] / Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. –112 с.

2. **Юревич, Е.И.** Фотонная техника [Текст] / Е.И. Юревич. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2003.

УДК 615.47

*Н.А. Грязнов, А.В. Лопота, Е.Н. Соснов*
*Санкт-Петербург, Россия*

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

*N.A. Gryaznov, A.V. Lopota, E.N. Sosnov*
*St.-Petersburg, Russia*

# COMPLEX APPROACH TO SOLVING TASKS OF MEDICAL ROBOTICS

Рассмотрены возможности синергетической интеграции таких ключевых медицинских технологий, как лазерная хирургия, эндоскопическая диагностика и эндовидеохирургия, аппаратная перфузия органа или участка тела пациента с формированием локального изолированного контура кровообращения, а также роботизированные системы управления инструментом.

МЕДИЦИНСКАЯ РОБОТОТЕХНИКА. ПЕРФУЗИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ХИРУРГИЯ. ЭНДОВИДЕОХИРУРГИЯ.

Synergetic integration of such key medical technologies as laser surgery, endoscopic diagnostics and endovideosurgery, apparatus perfusion of a patient organ or body sector with formation of local blood loop, and robotic control system opens new horizons of low-invasion surgery.

MEDICAL ROBOTICS. PERFUSION. LASER SURGERY. ENDOVIDEOSURGERY.

Угроза для жизни человека, требующая срочного медицинского вмешательства, является экстремальной ситуацией сама по себе. Вдвойне сложнее, когда она отягощена внешними экстремальными обстоятельствами, будь то природные катастрофы, террористические акты или даже просто условия, в которых оказание врачебной помощи затруднительно. Каких бы успехов не добилась современная хирургия в крупных медицинских центрах и клиниках, существует широкий спектр областей деятельности человека, при которых быстрая доставка пациента в стационар является сложной, а подчас и неразрешимой проблемой.

Вместе с тем скорость и качество восстановления пациента после оказания ему хирургической помощи зависит не только от времени его доставки в операционную, но и от размеров травмы, полученной им дополнительно во время операции. Переход от полостных операций к лапароскопическим и формирование эндовидеохирургии определяют наиболее перспективное направление развития современной хирургии. Понятие «малоинвазивной хирургии» по мере развития медицинского инструментария и соответствующих технологий постепенно наполняется физическим смыслом.

Предлагаемый в данной статье комплексный подход к малоинвазивной хирургии заключается в синергетической интеграции следующих ключевых медицинских технологий:

лазерной хирургии;

эндоскопической диагностики и эндовидеохирургии;

аппаратной перфузии органа или участка тела пациента с формированием локального изолированного контура кровообращения;

роботизированного управления инструментом.

Одним из основных факторов дополнительного травмирования пациента во время хирургической операции являются продукты распада собственных биологических тканей, поврежденных механическим, термическим или иным воздействием. Борьба с этим явлением должна идти сразу по двум направлениям: наряду с минимизацией вносимых повреждений необходимо озаботиться процессом удаления тех самых продуктов распада.

Рассмотрим возможные пути минимизации

травмирования пациента хирургом. Лазерные технологии хороши тем, что они прекрасно комплексируются с лапароскопическими методами и другими приемами эндовидеохирургии. Они позволяют не только рассекать ткань, но и осуществлять термическое воздействие, например коагуляцию биологических жидкостей или тканей. Для достижения необходимого сочетания биологических эффектов можно использовать комбинацию лазерных источников с различными спектральными характеристиками.

Например, воздействие лазерного излучения с двумя длинами волн может варьироваться в зависимости от соотношения мощностей источников, притом что излучение с длиной волны 1470 нм (глубина проникновения 0,1–0,3 мм, хорошая абляция) эффективно рассекает биоткань, а излучение с длиной волны 980 нм (глубина проникновения 2–3 мм, хорошая свертываемость) эффективно «заваривает» место разреза.

Ключевым недостатком современных лазерных скальпелей является отсутствие волоконного выходного коллиматора и технологии дистанционного рассечения. В результате проводимую процедуру даже трудно назвать бесконтактным воздействием, поскольку одним из ключевых факторов является термическое воздействие раскаленного торца волокна со всеми вытекающими из этого негативными последствиями.

Наиболее перспективным способом решения указанной проблемы является доставка лазерного излучения по световоду из жидкости по технологии компании Synova (Швейцария), использующей ее для резки тонких металлических листов [1]. На рис. 1 показано устройство для формирования струи жидкости и ввода излучения в этот своеобразный световод.

Для медицинских применений в качестве жидкости целесообразно использовать физиологический раствор, но никого не удивит, если в процессе формирования технологии будут выявлены лекарственные средства, которые будут вводиться в нее по дополнительным показаниям. Жидкость в данном случае играет двойную роль: удерживает излучение внутри струи и отводит тепло.

Первое обстоятельство позволяет отводить наконечник лазерного скальпеля от места воздействия на дистанцию стабильности струи (зависит от давления и диаметра) без потери энергетики. Второе – нивелирует термическое воздействие за пределами обрабатываемой зоны, снижая травму, наносимую пациенту. Заметим, что малый диаметр струи (десятки микрон) даже при высоком давлении (десятки атмосфер) обеспечивает малый расход жидкости (единицы миллилитров в минуту).

При использовании указанной технологии появляется возможность, отодвинувшись от обрабатываемой зоны, осуществлять визуальный мониторинг процесса непосредственно во время воздействия или сразу после восстановления оптической прозрачности. На рис. 2 приведен вариант усовершенствования современного эндовидеохирургического инструментария для проведения вапоризации аденомы простаты.

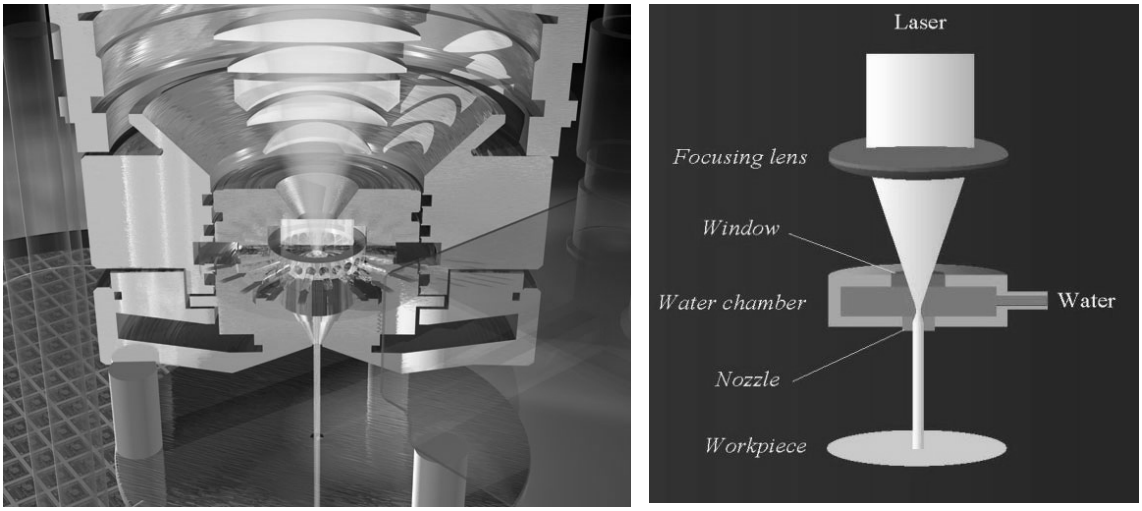



Рис. 1. Формирование световода из струи жидкости (слева) и оптическая схема ввода излучения в струйный световод (справа)

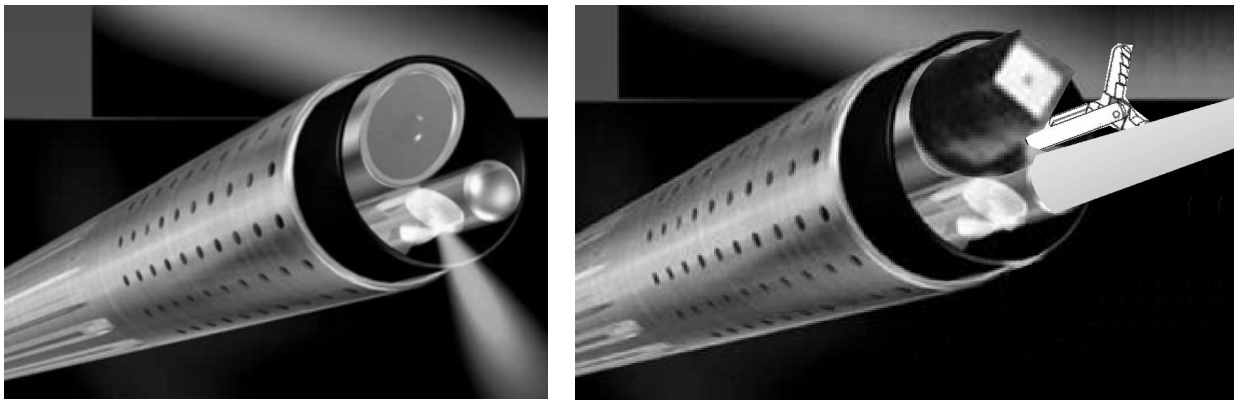


Рис. 2. Современный инструмент эндовидеохирургии (слева) и вариант его усовершенствования (справа)

Замена волоконного излучателя с поворотным зеркалом на конце струйным световодом обеспечивает возможность работы в заданном направлении на требуемом удалении. Использование простейших захватов позволит не только фиксировать зону обработки, но и осуществлять простейшие процедуры по зажиму сосудов или соединению тканей, которые необходимо сварить друг с другом.

Отдельного внимания требует использование современных телевизионных средств взамен волоконных методов передачи изображения. В первую очередь это связано с высокой стоимостью последних и невозможностью осуществления их полноценной стерилизации, что обусловлено самой природой жгута оптических волокон. Современные сверхминиатюрные камеры лишены указанных недостатков.

Габариты микрокамеры компании Awaiba (Германия) составляют 1×1×1,5 мм$^3$, а стоимость даже на сегодняшний день не превышает 15 тыс. руб [2]. В дальнейшем можно ожидать лишь дополнительного снижения стоимости. При этом она обеспечивает в цветном или монохромном изображении разрешение 256×256 пикселей с длиной шлейфа до 3 м. Снижение габаритов эндоскопического инструмента также является одним из существенных факторов понижения негативного воздействия хирургического инструмента.

Тем не менее основная роль в борьбе с продуктами распада, возникающими при хирургических операциях, должна принадлежать перфузионной технике (см. рис. 3). Это обусловлено тем, что их распространение по организму пациента осуществляется преимущественно кровеносной системой. Следовательно, одним из наиболее перспективных приемов подготовки к проведению операции является перфузионная изоляция органа, на котором проводится операция, или соответствующего участка тела от остального организма.

Другими словами, орган должен быть отключен от кровеносной системы (если он жизненно необходим, то на это время он заменяется искусственным) и подключен к отдельной перфузионной системе [3]. Это позволит не только снизить кровопотери за счет использования заменителей в выделенном контуре, но и провести эффективную фильтрацию.

Перфузионная техника для изоляции области операции позволит осуществить следующие процедуры:

селективную фильтрацию или удаление из кровеносного русла продуктов абляции;

восстановление нормального обмена веществ в тканях после проведения операций;

таргетную доставку медикаментозных препаратов в область проведения операции (например, фотосенсибилизатора при ФДТ).

Для реализации указанных технологий необходимо обеспечить надежное подключение к кровеносной системе пациента на уже провозглашенных принципах минимизации негативного воздействия. Комплексирование технологий подразумевает внедрение уже на данной стадии операции роботизированного управления медицинским инструментом. Можно сформулировать ключевые функции основных подсистем медицинской робототехники:

1) функции исполнительных элементов – усиление и повышение точности при снижении поперечного сечения;

Рис. 3. Схема подключения перфузионной техники (слева) и образец перфузионного насоса (справа)

2) функции сенсорной аппаратуры – контроль параметров пациента и аппаратуры;

3) функции системы управления – ассистирование хирургу в части оперативного решения многопараметрической задачи.

Подводя итоги следует подчеркнуть следующее.

Комбинирование лазерного воздействия с технологией формирования микроструи позволит не только повысить эффективность доставки излучения, но и уменьшить поражение тканей за пределами зоны обработки за счет эффективного отвода тепла.

Использование нескольких длин волн лазерного излучения даст возможность варьировать и оптимизировать соотношение процессов рассечения и коагуляции для различных операционных процедур.

Замена жгута оптических волокон на сверхминиатюрные телекамеры обеспечит снижение поперечных габаритов инструмента для эндовидеохирургии.

Применение перфузионной техники для формирования полностью изолированных участков организма позволит существенно снизить негативное воздействие от попадания поврежденных инструментом тканей и продуктов их распада в кровеносную систему и не участвующие в операции органы пациента.

Роботизация сложной техники необходима для избавления медицинского персонала от рутинных процессов, контроля большого количества параметров и ассистирования хирургу при проведении процедур, требующих особых усилий или высокой филигранности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kray, D.** Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with waterjet-guided laser [Text] / D. Kray, S. Hopman, A. Spiegel [et al.] // Solar Energy Materials & Solar Cells. –2007. –Vol. 91. –P. 1638–1644.

2. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: http://www.awaiba.com/v2/wp-content/uploads/2010/01/NanEye_USB_evaluation_unit_v1.04_web.pdf

3. **Лопота, В.А.** Разработка нового поколения медицинских аппаратных комплексов на основе перфузионных насосов «Марс» [Текст]/ В.А. Лопота, А.С. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.Б. Митренин, К.Ю. Сенчик, А.Д. Юхнев// Современные наукоемкие технологии. –2004. –№ 4. –С. 39–40.

УДК 615.47

*К.Ю. Сенчик, В.В. Харламов*
*Санкт-Петербург, Россия*

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ МЕХАТРОННЫХ АППАРАТОВ ПОДДЕРЖАНИЯ КРОВООБРАЩЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

*K.Yu. Senchik, V.V. Kharlamov*
*St.-Petersburg, Russia*

# PROSPECTS OF CREATING MINIATURE MECHATRONIC DEVICES FOR SUPPORT OF BLOOD MOTION IN HUMAN BODY AT EXTREME SITUATIONS

Рассмотрены перспективы создания миниатюрных роботизированных систем поддержания кровообращения в организме человека при остановке сердечной деятельности или угнетении ее функции вследствие внешних или внутренних причин.

ПЕРФУЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ. МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИТУАЦИЯ. РЕАНИМАЦИЯ.

Creation of miniature robotic systems for support of blood motion in human body ensures medical help at heart activity break of suppression of its function due to exterior or interior reasons.

PERFUSION SYSTEMS. MECHATRONIC MODULES. EXTREME SITUATION. REANIMATION.

Достигнутый в настоящее время уровень развития мехатроники, материаловедения и теории систем управления обеспечивает предпосылки для создания миниатюрных роботизированных систем поддержания кровообращения в организме человека при остановке сердечной деятельности или угнетении ее функции вследствие внешних или внутренних причин (ранение, травма, отравление, острый инфаркт миокарда и т. п.) [1].

Наиболее востребованными такие системы оказываются в условиях чрезвычайных ситуаций или при воздействии на организм человека экстремальных факторов. При остановке кровообращения в тканях организма человека развиваются быстропрогрессирующие ишемические повреждения, которые могут стать необратимыми и привести к смерти или инвалидизации. Наиболее чувствительными к ишемии являются клетки мозга и сердца. Остановка кровообращения на время более 5 мин в условиях нормотермии (при температуре тела 36,6 °С) приводит к смерти коры головного мозга [2].

В этих условиях немедленное искусственное поддержание кровообращения в организме с помощью внешних или внутренних устройств является единственным возможным лечебным воздействием, позволяющим сохранить жизнь больному, раненому или пострадавшему.

Экстремальная ситуация – это обстоятельства, складывающиеся в результате стихийных бедствий, катастроф, аварий и т. п., которые влекут за собой трагические последствия: массовые человеческие жертвы, различного рода поражения, требующие экстренных, скоординированных действий со стороны медицинских служб различного подчинения. В полной мере данное положение подходит и к возникновению у человека заболевания или даже ранних симптомов его начала, когда организм оказывается в критическом состоянии.

В данной ситуации необходимо своевременно и в полном объеме получить информацию о состоянии жизненных систем, в автоматическом режиме ее обработать с применением компьютер-

ных экспертных систем и сформировать и направить управляющие команды на исполнительные устройства: перфузионные насосы, дыхательные аппараты и т. п. Эффективность мероприятий, направленных на коррекцию жизненно важных функций, определяется степенью комплексирования данных систем на основе современных методов кибернетики.

Одним из важнейших условий для эффективного и положительного результата действий медицинской службы в условиях экстремальных ситуаций, кроме квалификации персонала, является наличие медико-технического обеспечения со своим составом технических средств, предусматривающих различные принципы построения аппаратуры для проведения необходимых лечебно-профилактических мероприятий.

Данная задача на современном научном уровне с успехом может быть решена с применением средств телемедицины, организацией не только консультативно-диагностического канала связи и мониторинга жизненных показателей пострадавшего в реальном времени, но и с возможностью автоматического актуаторного воздействия (инфузия лекарственных препаратов, кровезаменителей и т. д.).

Тщательный анализ уже имеющихся медико-технических средств отечественного и зарубежного производства, изучение опыта ликвидации последствий катастроф выявил практически полное отсутствие в табеле оснащения медицинских служб современных отечественных аппаратов для обеспечения длительных инфузий лекарственных препаратов или организации экстракорпоральных (вне тела человека) процедур, таких, как гемодиализ, плазмаферез, гемосорбция, соответствующих требованиям применения в условиях экстремальных ситуаций.

Для медицины критических состояний наиболее характерны следующие клинические синдромокомплексы: сердечно-легочная недостаточность, острая кровопотеря, токсический и болевой шок, синдром длительного сдавления, лучевая болезнь.

Исход лечебных мероприятий у пострадавших при экстремальных ситуациях во многом зависит от своевременности и полноты оказания им квалифицированной медицинской помощи в полном объеме. Экстренная транспортировка в специализированные учреждения не решает данной задачи, т. к. в большинстве клинических ситуаций значение имеют именно первые минуты после поражения.

Нам представляется целесообразным более широкое применение комплексного подхода, заключающегося в приближении этапа оказания квалифицированной медицинской помощи к очагу чрезвычайной ситуации за счет внедрения автоматических и телемедицинских аппаратов поддержания жизнедеятельности и, в частности, инфузионно-перфузионных систем, использующих современный мехатронный принцип организации движения биологических жидкостей и лекарственных препаратов, в т. ч. и экстракорпорально [3]. В данных обстоятельствах важнейшим требованием, предъявляемым к аппаратуре, является ее миниатюрность.

Несмотря на то что целый ряд перфузионных аппаратов, успешно используемых в «плановой» медицине, может применяться и в экстремальной, им для требуемых условий не хватает надежности, простоты и удобства в работе, приспособлений и устройств переноски, крепления и развертывания, широты функциональных возможностей. К тому же высокая стоимость специализированной аппаратуры не позволяет оснастить соответствующие структуры с учетом резервов развертывания, необходимых в экстремальной ситуации.

В настоящее время во всех промышленно-развитых странах ведутся активные работы по созданию малогабаритных автономных средств обеспечения жизнедеятельности пострадавших. С одной стороны, актуальность данной тематики обусловлена возрастающим количеством техногенных и природных катастроф, локальных военных конфликтов и ростом числа пострадавших, а с другой, совершенствованием медицинских методик лечения критических состояний организма человека и созданием новых технических средств, основанных на применении современных принципов робототехники и мехатроники.

Реализация принципов автономности и малогабаритности таких средств диктуется необходимостью приближения этапа оказания специализированной медицинской помощи к пострадавшим, тем самым обеспечивая своевременность, а значит, и большую эффективность лечебных мероприятий.

Важнейшей, пока еще не решенной задачей является автоматическая или дистанционно управляемая (с помощью средств телемедицины) установка на теле больного или пострадавшего

внешних устройств поддержания кровообращения, или подключение к сосудистой системе организма перфузинных аппаратов. Решение может быть реализовано на основе создания специализированных роботов и средств робомедицины.

В настоящее время рядом предприятий на базе ЦНИИ РТК разрабатывается структура и технология изготовления комплексных систем жизнеобеспечения пострадавших на основе мехатронных модулей перфузии «МАРС», подготовленных к серийному производству, а также систем мониторинга витальных функций организма человека «ТЕЛЕЦ», комплексирование данных систем с другими аппаратами и средствами программного обеспечения, например, «ГЕРКУЛЕС». Ведется разработка робота для автоматической установки внутрисосудистых катетеров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов, А.В.** Мини- и микроробототехника [Текст] / А.В. Иванов. –СПб., 2011. –С. 34–38.

2. **Reznik, O.** Mousyuk Extracorporal normothermic abdominal perfusion «in situ» by leukocytes-free oxygenated blood as resuscitation practice for kidneys from uncontrolled donors with one-hour warm ischemic time [Text] / O. Reznik, A. Ananyev, I. Loginov, A. Skvortcov, S. Bagnenko, Y. Mousyuk // Transplantation. –2010. –Vol. 90. –№ 2. –289 p.

3. **Сенчик, К.Ю.** Комплексирование систем кибернетического мониторинга и коррекции жизненных функций организма [Текст] / К.Ю. Сенчик, В.В. Кириченко, Н.А. Грязнов // Робототехника. Взгляд в будущее. –СПб., 2010. –С. 95–97.

УДК 616.154

*О.Н. Резник, А.Е. Скворцов, А.О. Резник*
*Санкт-Петербург, Россия*

# СОХРАНЕНИЕ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДОНОРСКИХ ОРГАНОВ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТНОЙ ГЕМОПЕРФУЗИИ

*O.N. Reznik, A.E. Skvortsov, A.O. Reznik*
*St.-Petersburg, Russia*

# CONSERVATION OF ISOLATED DONOR ORGAN VIABILITY BY APPARATUS HEMOPERFUSION

Рассмотрен способ сохранения жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной нормотермической перфузии. Применение мехатронных и роботизированных систем позволяет не только сохранять жизнеспособность ишемически поврежденных изолированных донорских органов, возможность пересадки которых ранее не рассматривалась, но и проводить их реабилитацию, селекцию и лечение.

ДОНОРСКИЕ ОРГАНЫ. ПЕРФУЗИЯ. ТРАНСПЛАНТАЦИЯ. РЕАНИМАЦИЯ. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ.

Application of mechatronic and robotic systems enables not only saving viability of ischemically damaged isolated donor organs, earlier not considered for transplantation, but also their rehabilitation, selection and treatment.

DONOR ORGANS. PERFUSION. TRANSPLANTATION. REANIMATION. ROBOTIC SYSTEMS.

Главная причина недоступности трансплантации органов всем нуждающимся пациентам – дефицит донорских органов, носящий транснациональный характер. На ранних этапах своего развития успех трансплантации определялся идеальным качеством как самого донора, так и донорского органа. Известно, что все трансплантаты не могут быть идеального качества [1], и с середины 90-х гг. изменяются критерии их отбора и приемлемости, стратегия дооперационной селекции, заготовки, распределения и консервации [2]. Снижение количества доноров со смертью мозга и критическая нехватка донорских органов в целом создает в настоящее время предпосылки для использования альтернативных источников донорских органов.

Единственным способом воздействия на такие донорские органы до операции является метод аппаратной перфузии как в теле донора, так и вне его (изолированная перфузия органа). Способ сохранения жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной нормотермической перфузии позволяет проводить реабилитацию, диагностику и лечение ишемически поврежденных донорских органов, полученных от доноров с расширенными критериями, что дает возможность модифицировать донорский орган до трансплантации, улучшая тем самым качество трансплантата [3].

Способ сохранения жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной нормотермической перфузии состоит в следующем: после эксплантации на фоне продолжающейся экстракорпоральной нормотермической перфузии оксигенированной кровью с удаленными лейкоцитами донорский орган помещается в устройство для проведения аппаратной изолированной перфузии донорского органа модифицированной кровью донора с продолжением удаления лейкоцитарных микротромбов, поддержанием нормального уровня метаболизма и температуры на уровне 30–32 °С.

Схема аппаратного комплекса для проведения изолированной перфузии донорских органов включает: два роликовых насоса (мехатронные модули «МАРС»), венозный резервуар, резервуар с модифицированной донорской кровью, мембранный оксигенатор, лейкоцитарный фильтр,

угольный нанофильтр, источник подачи кислорода, теплообменный элемент, систему портов для отбора проб и введения лекарственных препаратов.

Аппаратная перфузия проводится со скоростью от 0,05 до 5,0 л/мин (постепенное увеличение от 0,05 л/мин до рекомендуемых величин), потоком кислорода от 25 до 550 мл/мин и продолжается до тех пор, пока не будет достигнута нормализация лабораторных и биохимических показателей, контроль которых осуществляется каждые 20 мин. Перфузат состоит из взвеси эритроцитов, консервирующего стабилизирующего раствора с добавлением фармакологических препаратов, снижающих повреждающий эффект ишемического страдания донорского органа и восстанавливающих нормальный уровень его метаболизма.

**Материалы и методы.** В сентябре 2012 г. в СПбНИИ СП нашей группой была выполнена эксплантация с применением перфузионного протокола у асистолического донора В., которым стал мужчина 45 лет, находящийся в стационаре с диагнозом закрытая черепно-мозговая травма, ушиб головного мозга тяжелой степени.

Донорские органы изъяли после остановки кровообращения, проведения комплекса реанимационных мероприятий без эффекта. Время первичной тепловой ишемии составило 60 мин. Оба трансплантата поместили в устройство для проведения изолированной нормотермической гемоперфузии, разработанное в ходе тесного сотрудничества между СПбНИИ СП имени И.И. Джанелидзе и ГНЦ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики.

Перфузия донорских органов продолжалась 2 ч 10±5 мин, их состояние оценивалось по цвету и консистенции, которые не отличались от физиологических, об адекватности перфузии мы судили по снижению уровня лейкоцитов в перфузате ниже $1\times10^9$. Обратило внимание восстановление диуреза. Выполнили экспресс-биопсию, не выявившую каких-либо патологических изменений.

**Результаты.** Оба трансплантата пересажены по стандартной хирургической технике. Реципиенты находились в листе ожидания СПбНИИ СП и подписали информированное согласие на трансплантацию почки от донора с необратимой остановкой кровообращения. Функция обоих трансплантатов была немедленной. К концу года после операции уровень креатинина сыворотки крови составил 100 мкмоль/л и 115 мкмоль/л, что соответствует нормальным показателям функции трансплантата.

Способ сохранения жизнеспособности изолированных донорских органов с помощью аппаратной нормотермической перфузии показал себя как перспективный метод расширения пула доступных донорских органов за счет использования доноров с внезапной необратимой остановкой кровообращения. Применение мехатронных и роботизированных систем позволяет не только сохранять жизнеспособность ишемически поврежденных изолированных донорских органов, возможность пересадки которых ранее не рассматривалась, но и проводить их реабилитацию, селекцию и лечение.

Данный метод может применяться в любом центре трансплантации, в центрах органного донорства в процессе работы с асистолическими донорами, с донорами с внезапной необратимой остановкой сердечной деятельности отделений реанимации и шокового зала, с донорами с расширенными критериями. Использование его определяет большую доступность трансплантационной помощи пациентам с терминальными стадиями хронических заболеваний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биленко, М.В.** Ишемические и реперфузионные повреждения органов [Текст] / М.В. Биленко. –М.: Медицина, 1989. –386 с.

2. **Онищенко, Н.А.** Консервация органов и тканей [Текст] / Н.А. Онищенко, В.И. Шумаков, Е.Ш. Штенгольц; Под ред. Б.В. Петровского. –М.: Медицина, 1975. –252 с.

3. **Bagnenko, S.F.**. Machine perfusion as a tool to select kidneys recovered from uncontrolled donors after cardiac death [Text] / S.F. Bagnenko, Y.G. Moysyuk, O.N. Reznik, I.Y. Loginov [et al.] // Transplant. Proc. –2008. –Vol. 40. –№ 4. –P. 1023–1026.

# IX объединенная Европейская конференция по программной инженерии (ESEC) и Симпозиум по основам программной инженерии ACM SIGSOFT (FSE)

Европейская конференция по программной инженерии, совмещенная с Симпозиумом по основам программной инженерии ACM SIGSOFT – это одно из важнейших и самых престижных событий мирового уровня в области разработки программного обеспечения. В 2013 году конференция пройдет в северной столице России Санкт-Петербурге. ESEC/FSE по праву завоевал международное признание среди исследователей и разработчиков ПО как платформа для демонстрации и обсуждения инноваций, тенденций и новых задач в области программной инженерии.

## ESEC/FSE 2013 Приглашение к участию

### Научно-исследовательские статьи

К участию приглашаются статьи, описывающие оригинальные и ранее не опубликованные результаты теоретических, концептуальных и экспериментальных исследований в области программной инженерии. Статьи должны содержать значительные и инновационные результаты, связанные с тематикой ESEC/FSE. Также будут рассматриваться работы, предлагающие революционные подходы к актуальным проблемам. В целях воспроизводимости результатов особенно приветствуется использование данных и программных средств, находящихся в открытом доступе.

**Темы конференции:** Мы заинтересованы в участии представителей как академического сообщества, так и индустрии разработки ПО, при условии что тема работы относится к программной инженерии. К таким темам относятся:

- Компоненты, сервисы, связующее ПО
- Развертка и управление конфигурацией систем
- Среды и инструменты разработки
- Распределенная разработка и аутсорсинг
- Распределенное, мобильное и встроенное ПО
- Встроенное ПО и системы реального времени
- Эмпирические исследования и метрики
- Разработка ПО для конечного пользователя
- Поддержка и эволюция программных систем
- Разработка, управляемая моделями
- Шаблоны, фреймворки и серии программных продуктов
- Параллельное и распределенное программирование
- Визуализация программ
- Управление требованиями
- Обратная разработка
- Архитектура ПО
- Экономика области разработки ПО
- Валидация, верификация и тестирование

### Ключевые даты

- Подача статей: до 1 марта 2013 г.
- Уведомление о принятии статей: 26 мая 2013 г.

### Секции

- Промышленная разработка ПО
- Новые идеи
- Демонстрации инструментов разработки
- Презентации актуальных технологий
- Симпозиум аспирантов
- Семинары

### Председатель конференции

- Бертран Мэйер, Высшая политехническая школа Цюриха, Швейцария, НИУ ИТМО, Россия

### Председатели программного комитета

- Лучано Барези, Миланский политехнический университет, Италия
- Мира Мезини, Дармштадский технический университет, Германия

### Программный комитет

- Свет Апель, Университет Пассау, Германия
- Антония Бертолино, ISTI-CNR, Италия
- Эрик Бодден, Дармштадский технический университет, Германия
- Пауло Борба, Федеральный университет Пернамбуко, Бразилия
- Витторио Кортеллесса, Л'Акуилский университет, Италия
- Элизабетта Ди Нитто, Миланский политехнический университет, Италия
- Массимилиано Ди Пента, университет Санньо, Италия
- Майкл Эрнст, Университет штата Вашингтон, США
- Патрик Ойгстер, университет Пердью, США
- Алессандро Гарсия, Католический университет Рио-де-Жанейро, Бразилия
- Виктор Гергель, Нижегородский государственный университет, Россия
- Пауль Грююнбахер, Линцкий университет, Австрия
- Марк Харман, Университетский колледж Лондона, Великобритания
- Патрик Хейманс, Намурский университет, Бельгия
- Владимир Ицыксон, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия
- Наталия Юристо, Мадридский университет, Испания
- Грегор Кицзалес, Университет Британской Колумбии, Канада
- Шунгун Ким, Гонконгский университет науки и технологии, Гонконг
- Патрисия Лаго, Амстердамский свободный университет, Голландия
- Ненад Медвидович, университет Южной Калифорнии, США
- Алессандро Орсо, Технический университет Джорджии, США
- Харольд Осшер, IBM Research, США
- Корина Пасариану, NASA, США
- Мауро Пецце, Луганский университет, Швейцария
  Миланский университет Бикокка, Италия
- Авайс Рашид, Ланкастерский университет, Великобритания
- Мартин Робильярд, Университет Макгилла, Канада
- Вильгельм Шэфер, Падерборнский университет, Германия
- Паоло Тонелла, Фонд Бруно Кесслера, Италия
- Себастиан Учитель, Университет Буэнос-Айреса, Аргентина
  и Имперский колледж Лондона, Великобритания
- Ари ван Дойрсен, Делфтский технический университет, Голландия
- Виллем Виссер, Стелленбосский университет, ЮАР
- Андреас Целлер, Университет Саарландеса, Германия
- Андреа Цисман, Университет Сити, Великобритания

ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Swiss Federal Institute of Technology Zurich · acm Association for Computing Machinery · SIGSOFT · ITMO

http://2013.esec-fse.org

# 9th joint meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on the Foundations of Software Engineering

The 9th joint meeting of the European Software Engineering Conference and the ACM SIGSOFT Symposium on the Foundations of Software Engineering will take place in the unique Saint Petersburg, Russia, the imperial capital of Russia and a major European cultural center. Held bi-annually, ESEC/FSE is an internationally renowned forum for researchers, practitioners, and educators to present and discuss the most recent innovations, trends, experiences, and challenges in the field of software engineering.

## ESEC/FSE 2013 Call for papers

### Research track

We invite high quality submissions describing original and unpublished results of theoretical, empirical, conceptual, and experimental software engineering research. Contributions should describe innovative and significant original research relevant to ESEC/FSE. Submissions of papers describing groundbreaking approaches to emerging problems will also be considered. Submissions that facilitate reproducibility by using available data sets or making the described tools publicly available are especially encouraged.

**Topics of Interest:** We are interested in submissions from both industry and academia on all topics related to software engineering. These include, but are not limited to:

- Components, services, and middleware
- Configuration management and deployment
- Development environments and tools
- Distributed and outsourced development
- Distributed, mobile, and pervasive software
- Embedded and real-time software
- Empirical studies and Metrics
- End-user software engineering
- Maintenance and evolution
- Model-driven software engineering
- Patterns, frameworks, and product lines
- Parallel and concurrent software
- Program comprehension and visualization
- Requirements engineering
- Reverse engineering
- Software architecture
- Software economics
- Validation, verification, and testing

### Important dates

- Research papers due: March 1, 2013
- Notification to authors: May 26, 2013

### Further tracks

- Artifact Evaluation
- Industrial Track
- New Ideas Track
- Tool Demonstrations Track
- Technical Briefings Track
- Doctoral Symposium
- Workshops

### General Chair

- Bertrand Meyer, ETH Zurich, Switzerland and ITMO, Russia

### Program Chairs

- Luciano Baresi, Politecnico di Milano, Italy
- Mira Mezini, Technische Universität Darmstadt, Germany

### Program Committee

- Sven Apel, Universität Passau, Germany
- Antonia Bertolino, ISTI-CNR, Italy
- Eric Bodden, Technische Universität Darmstadt, Germany
- Paulo Borba, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
- Vittorio Cortellessa, Università dell'Aquila, Italy
- Elisabetta Di Nitto, Politecnico di Milano, Italy
- Massimiliano Di Penta, Università del Sannio, Italy
- Michael Ernst, University of Washington, USA
- Patrick Eugster, Purdue University, USA
- Alessandro Garcia, PUC Rio, Brasil
- Victor Gergel, University of Nijny Novgorod, Russia
- Paul Grünbacher, Universität Linz, Austria
- Mark Harman, University College London, United Kingdom
- Patrick Heymans, University of Namur, Belgium
- Vladimir Itsykson, Saint-Petersburg State Polytechnical University, Russia
- Natalia Juristo, University of Madrid, Spain
- Gregor Kiczales , University of British Columbia, Canada
- Sunghun Kim, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong
- Patricia Lago, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands
- Nenad Medvidovic, University of Southern California, USA
- Alessandro Orso, Georgia Tech, USA
- Harold Ossher, IBM Research, USA
- Corina Pasareanu, NASA, USA
- Mauro Pezzè, University of Lugano, Switzerland and University of Milano Bicocca, Italy
- Awais Rashid, Lancaster University, United Kingdom
- Martin Robillard, McGill University, Canada
- Wilhelm Schäfer, Universität Paderborn, Germany
- Paolo Tonella, Fondazione Bruno Kessler, Italy
- Sebastian Uchitel, Universidad de Buenos Aires, Argentina and Imperial College London, United Kingdom
- Arie van Deursen, Delft University of Technology,The Netherlands
- Willem Visser, Stellenbosch University, South Africa
- Andreas Zeller, Universität des Saarlandes, Germany
- Andrea Zisman, City University, United Kingdom

**http://2013.esec-fse.org**

# СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
# LIST OF AUTHORS

**БРОНШТЕЙН Ефим Михайлович** – *профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор физико-математических наук.*

450000, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел.: 8(347)273-79-67, e-mail: bro-efim@yandex.ru

**BRONSHTEIN, Efim M.** *Ufa State Aviation Technical University.*

450000, K. Marksa Str. 12. Ufa. Russia. E-mail: bro-efim@yandex.ru

**БРУНАРСКИЙ Павел Николаевич** – *младший научный сотрудник Института точной механики и вычислительной техники имени С.А. Лебедева Российской академии наук.*

119991, Россия, Москва, Ленинский пр., д. 51. E-mail: pbrunarskiy@gmail.com

**BRUNARSKIY, Pavel N.** *Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering, Russian Academy of Sciences (IPMCE).*

119991, Leninskiy prospekt, 51. Moscow. Russia. E-mail: pbrunarskiy@gmail.com

**БУДАНОВ Дмитрий Олегович** – *студент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: dmitriy.budanov@gmail.com

**BUDANOV, Dmitriy O.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: dmitriy.budanov@gmail.com

**ВАСИЛЬЕВ Андрей Викторович** – *ведущий конструктор Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», соискатель ученой степени кандидата технических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-60-93, e-mail: andrspan@yandex.ru

**VASILIEV, Andrey V.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: andrspan@yandex.ru

**ВАСИЛЬЕВ Иван Анатольевич** – *начальник лаборатории систем автономного и адаптивного управления Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат технических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-07-80, e-mail: vas@rtc.ru

**VASILYEV, Ivan A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: vas@rtc.ru

**ГИНДУЛЛИН Рамиз Вилевич** – *аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.*

450000, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. E-mail: gramiz@mail.ru

**GINDULLIN, Ramiz V.** *Ufa State Aviation Technical University.*

450000, K. Marksa Str. 12. Ufa. Russia. E-mail: gramiz@mail.ru

**ГОНЧАР Игорь Викторович** – *аспирант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).*

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5. E-mail: goncharmail@gmail.com

**GONCHAR Igor V.** *Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI».*

197376, Professora Popova Str. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: goncharmail@gmail.com

**ГРАДОВЦЕВ Алексей Андреевич** – *заместитель главного конструктора по робототехнике и робостроению Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат технических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. 8(812)552-60-93, e-mail: a.gradovtsev@rtc.ru

**GRADOVTSEV, Aleksey A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.gradovtsev@rtc.ru

**ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич** – *начальник отделения Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат физико-математических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. 8(812)294-47-36, e-mail: gna@rtc.ru

**GRYAZNOV, Nikolay A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: gna@rtc.ru

**ДЕМИДОВ Дмитрий Андреевич** – *заведующий лабораторией Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. E-mail: cttf@.mail.ru

**DEMIDOV, Dmitriy A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: cttf@.mail.ru

**ЕНУЧЕНКО Михаил Сергеевич** – *студент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: post@mixeme.ru

**YENUCHENKO, Mikhail S.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: post@mixeme.ru

**ИВАНОВ Александр Александрович** – *заведующий кафедрой мехатроники и робостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: al_ivanov@rtc.ru

**IVANOV, Aleksandr A.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: al_ivanov@rtc.ru

**КОНДРАТЬЕВ Александр Сергеевич** – *заместитель директора по научной работе Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат технических наук, доцент.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. E-mail: kondr@rtc.ru

**KONDRATYEV, Aleksandr S.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: kondr@rtc.ru

**КУПРИЯНОВ Юрий Викторович** – *преподаватель кафедры корпоративных информационных систем факультета бизнес-информатики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».*

105187,Россия, Москва, ул. Кирпичная, д. 33. E-mail: yury.kupriyanov@gmail.com

**KUPRIYANOV, Yuriy V.** *National Research University Higher School of Economics.*

105187, Kirpichnaya Str. 33. Moscow. Russia. E-mail: yury.kupriyanov@gmail.com

**ЛИТОВКА Юрий Владимирович** – *профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Тамбовского государственного технического университета, доктор технических наук.*

392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106. E-mail: polychem@list.ru

**LITOVKA, Yuriy V.** *Tambov State Technical University.*

392000, Sovetskaya Str. 106. Tambov. Russia. E-mail: polychem@list.ru

**ЛОБАНОВ Николай Александрович** – *аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.*

634050, г. Томск, ул. Ленина, д. 40. Тел.: 8(3822)413-398, e-mail: LobanovNA@sibmail.com

**LOBANOV, Nikolay A.** *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.*

634050, Lenina prospect, 40. Tomsk. Russia. E-mail: LobanovNA@sibmail.com

**ЛОПОТА Александр Витальевич** – *директор-главный конструктор Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат экономических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-74-05, e-mail: rtc @rtc.ru

**LOPOTA, Aleksandr V.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: rtc @rtc.ru

**МАСЛОВСКАЯ Анна Геннадьевна** – *доцент кафедры математического анализа и моделирования Амурского государственного университета, докторант, кандидат физико-математических наук.*

675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское ш., д. 21. Тел. 8(4162)394-655, e-mail: maslovskayaag@mail.ru

**MASLOVSKAYA, Anna G.** *Amur State University.*

675027, Ignnatevskoe shosse, 21. Blagoveshensk. Russia. E-mail: maslovskayaag@mail.ru

**МАСЮК Андрей Александрович** – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: mahajrod@rambler.ru

**MASYUK, Andrey A.** *St. Petersburg State Polytechnical University*.

195251, Politekhnicheskaya Str. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: mahajrod@rambler.ru

**МЕДВЕДЕВ Тимофей Александрович** – *аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: there.is.me@gmail.com

**MEDVEDEV, Timofey A.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: there.is.me@gmail.com

**МОРОЗОВ Дмитрий Валерьевич** – *доцент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: dvmorozov@inbox.ru

**MOROZOV, Dmitriy V.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: dvmorozov@inbox.ru

**НЕСТЕРОВ Сергей Александрович** – *доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. 8(812)297-42-14, e-mail: nesterov@saiu.ftk.spbstu.ru

**NESTEROV, Sergey A.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: nesterov@saiu.ftk.spbstu.ru

**ПАДЕРНО Павел Иосифович** – *заслуженный деятель науки РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области образования, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), доктор технических наук.*

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5. E-mail: pipaderno@list.ru

**PADERNO Pavel I.** *Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI».*

197376, Professora Popova Str. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: pipaderno@list.ru

**ПОЛОВКО Сергей Анатольевич** – *заместитель главного конструктора Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат технических наук.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-4764, e-mail: polovko@rtc.ru

**POLOVKO, Sergey A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: polovko@rtc.ru

**ПОЛЯК Марк Дмитриевич** – *ассистент кафедры компьютерной математики и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, аспирант.*

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Тел.: 8(812)494-70-43, e-mail: markpolyak@gmail.com

**POLYAK, Mark D.** *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.*

190000, Bolshaya Morskaya Str. 67. St. Petersburg. Russia. E-mail: markpolyak@gmail.com

**РАБИНОВИЧ Борис Абрамович** – *начальник лаборатории Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-03-55.

**RABINOVICH, Boris A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics*.
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia.

**РЕЗНИК Александр Олегович** – *научный сотрудник Научно-исследовательского института скорой помощи имени И.И. Джанелидзе*.
192242, Россия, Санкт-Петербург, ул. Будапештская, д. 3. Тел.: 8(812)313-46-79

**REZNIK, Aleksandr O.** *State Research Institute for Emergency named after I.I. Dzhanelidze*.
192242, Budapeshtskaya Str. 3. St. Petersburg. Russia.

**РЕЗНИК Олег Николаевич** – *руководитель отделения Научно-исследовательского института скорой помощи имени И.И. Джанелидзе, доктор медицинских наук*.
192242, Россия, Санкт-Петербург, ул. Будапештская, д. 3. Тел.: 8(812)313-46-79. E-mail: onreznik@gmail.com

**REZNIK, Oleg N.** *State Research Institute for Emergency named after I.I. Dzhanelidze*.
192242, Budapeshtskaya Str. 3. E-mail: onreznik@gmail.com

**САДОВНИКОВ Владимир Юрьевич** – *аспирант кафедры систем коммутации и распределения информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича*.
191186, Россия, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 61. E-mail: sadko_sobaka@rambler.ru

**SADOVNIKOV, Vladimir Yu.** *The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg state university of communication*.
191186, Moika, 61. St. Petersburg. Russia. E-mail: sadko_sobaka@rambler.ru

**САРАДЖИШВИЛИ Сергей Эрикович** – *доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук*.
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: SSaradg@yandex.ru

**SARADGISHVILI, Sergey E.** *St. Petersburg State Polytechnical University*.
195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: SSaradg@yandex.ru

**СЕНЧИК Константин Юрьевич** – *главный научный сотрудник Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», доктор медицинских наук, профессор*.
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)556-33-51, e-mail: senkoy@inbox.ru.

**SENCHIK, Konstantin Yu.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: senkoy@inbox.ru.

**СКВОРЦОВ Андрей Евгеньевич** – *научный сотрудник Научно-исследовательского института скорой помощи имени И.И. Джанелидзе.*
192242, Россия, Санкт-Петербург, ул. Будапештская, д. 3. Тел.: 8(812)313-46-79

**SKVORTSOV, Andrey E.** *State Research Institute for Emergency named after I.I. Dzhanelidze.*
192242, Budapeshtskaya Str. 3. St. Petersburg. Russia.

**СМИРНОВА Екатерина Юрьевна** – *начальник отдела математического обеспечения и математического моделирования робототехнических и фотонных систем Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-47-64, e-mail: eus@rtc.ru

**SMIRNOVA, Ekaterina Yu.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: eus@rtc.ru

**СОЛОВЬЁВ Денис Сергеевич** – *аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Тамбовского государственного технического университета.*
392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106. E-mail: solovjevdenis@mail.ru

**SOLOVIEV, Denis S.** *Tambov State Technical University.*
392000, Sovetskaya Str. 106. Tambov. Russia. E-mail: solovjevdenis@mail.ru

**СОРОЦКИЙ Владимир Александрович** – *профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел.: 8(812)552-7679, e-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

**SOROTSKY, Vladimir A.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 29. St. Petersburg. Russia. E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

**СОСНОВ Евгений Николаевич** – *старший научный сотрудник Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)556-33-51, e-mail: e.sosnov@rtc.ru

**SOSNOV, Evgeniy N.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: e.sosnov@rtc.ru

**СТРУЧКОВ Игорь Вячеславович** – *доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел.: 8(812)297-22-23, e-mail: igor@ftk.spbstu.ru

**STRUCHKOV, Igor V.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnicheskaya Str. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: igor@ftk.spbstu.ru

**ТАРАТУХИН Виктор Владимирович** – *заведующий базовой кафедрой SAP Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», руководитель исследовательской группы в Европейском исследовательском центре информационных систем, Вестфальский университет Вильгельма (Мюнстер, Германия).*
105187, Россия, Москва, ул. Кирпичная, д. 33. E-mail: victor.taratoukhine@sap.com

**TARATUKHIN, Viktor V.** *National Research University Higher School of Economics.*
105187, Kirpichnaya Str. 33. Moscow. Russia. E-mail: victor.taratoukhine@sap.com

**ХАРЛАМОВ Вячеслав Валентинович** – *ведущий инженер Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)556-33-51, e-mail: sl@ltc.ru

**KHARLAMOV, Vyacheslav V.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: sl@ltc.ru

**ЦАРЕВ Виктор Михайлович** – *генеральный директор ОАО «Научно-технический центр современных навигационных технологий «Интернавигация», заслуженный работник связи Российской Федерации, заместитель председателя Межгосударственного совета «Радионавигация», председатель технического комитета по стандартизации «Радионавигация», кандидат технических наук.*
109028, Россия, Москва, Большой Трехсвятительский пер., д. 2. Тел.: 8(495)626-25-01, e-mail: tsarev.vik@yandex.ru

**TSAREV, Victor M.** *OJSC «Internavigation RTC».*
109028, Bolshoy Trehsvyatitelsky alley, 2. Moscow. Russia. E-mail: tsarev.vik @ yandex.ru

**ШМАКОВ Олег Александрович** – *начальник отдела Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
191036, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. E-mail: shmakov@rtc.ru

**SHMAKOV Oleg A.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics*.
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: shmakov@rtc.ru

**ШУБИН Пётр Константинович** – *начальник лаборатории Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат технических наук.*
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-05-69, e-mail: shubin@rtc.ru

**SHUBIN, Petr K.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: shubin@rtc.ru

**ЮДИН Виктор Иванович** – *заместитель директора по военно-промышленному комплексу Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», кандидат физико-математических наук.*
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-12-47, e-mail: yudin@rtc.ru

**YUDIN, Viktor I.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: yudin@rtc.ru

**ЮРЕВИЧ Евгений Иванович** – *Почетный главный конструктор Государственного научного центра Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», профессор кафедры мехатроники и робототехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*
194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел.: 8(812)552-45-44, e-mail: yurevich@rtc.ru

**YUREVICH, Evgeny I.** *Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tikhoretsky prospect 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: yurevich@rtc.ru

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»**

**«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL. COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»**

**№ 1 (164) 2013**

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
*Е.А. Калинина* – литературный редактор, корректор
*Г.А. Пышкина* – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 25.02.2013. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,06. Уч.-изд. л. 19,06. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

# УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

**в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»**

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикации представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 6 номеров в год.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

### 2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать 5, таблиц – 4, литературных источников – 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, аспирантов, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов – 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать 4, таблиц – 3, литературных источников – 10.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.1-2003).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MS Equation 3.0** или **MythType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – TNR, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

### 2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;

• сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;

• аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;

• рецензия на имя зам. главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы, о чем она сообщает автору (авторам).

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется по электронной почте на адрес редакции: **infocom@spbstu.ru**

### 2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

**Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:**
**8(812) 552-62-16 с $10^{00}$ до $18^{00}$ Галина Александровна**
**или по e-mail: infocom@spbstu.ru**