



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

4(200) 2014

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

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 ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Редакционная коллегия:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Prof. Dr. Philippe Ferrari, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Prof. Dr. Wolfgang Krautschneider, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Dr. Fa-Long Luo, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Prof. Dr. Emil Novakov, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия;

Шкодырев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия.

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 ВИНТИ 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 объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной 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, 2014

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

4(200) 2014

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2014

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsyson*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Prof. Dr. *Yuri G. Karpov*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

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 «Press of Russia» Joint Catalogue.

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, 2014

Содержание

Информационные технологии

Ефремова О.А., Павлов С.В., Соколова А.В. Интеграция трехмерных моделей потенциально опасных объектов в региональную систему информационной поддержки принятия решений	7
Самочадин А.В., Самочадина Т.Н., Тимофеев Д.А., Попов С.О. Базовая функциональность систем централизованного управления мобильными устройствами.....	17

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Глазунов В.В., Курочкин М.А. Программно-аппаратный стенд моделирования протоколов динамической маршрутизации сетевого уровня в мобильной гетерогенной сети	29
Котляров В.П., Иванов А.С. Методика тестирования высоконагруженных телекоммуникационных систем SMS оповещения	41

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Черноруцкий И.Г. Градиентные методы оптимизации больших систем	47
Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса	57
Черноруцкий И.Г. Релаксационные методы жесткой оптимизации.....	69

Системный анализ и управление

Круглов В. Н., Доросинский Л.Г., Чирышев Ю.В. Разработка модели следящей системы контроля местоположения изображения струи в пределах телевизионного кадра	79
Гайворонский С.А., Езангина Т.А. Робастное управление компенсацией веса звеньев космических аппаратов на стенде имитации невесомости	88

Информационные, управляющие и измерительные системы

Николаев С.Г., Ившина Ю.В. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок.....	95
---	----

Contents

Information Technologies

Efremova O.A., Pavlov S.V., Sokolova A.V. <i>Integration of three-dimensional models of potentially dangerous objects in regional system of information decision making support</i>	7
Samochadin A.V., Samochadina T.N., Timofeev D.A., Popov S.O. <i>Base features of mobile device management systems</i>	17

Telecommunications Systems and Computer Networks

Glazunov V.V., Kurochkin M.A. <i>Hardware-software modelling stand of dynamic routing protocols network layer in a mobile heterogeneous network</i>	29
Kotlyarov V.P., Ivanov A.S. <i>Principles of SMS informing system testing</i>	41

Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

Chernorutskiy I.G. <i>Gradient methods for large-scale minimization problems</i>	47
Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. <i>About logical-algebraic description of the transport logistic process</i>	57
Chernorutskiy I.G. <i>Sequence relaxation methods for stiff optimization problems</i>	69

System Analysis and Control

Krouglov V.N., Dorosinsky L.G., Chiryshev Yu.V. <i>Development of servo system model to control stream position within video frame</i>	79
Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A. <i>Robust control weight compensation links spacecraft stand weightlessness simulation</i>	88

Information, Control and Measurement Systems

Nikolaev S.G., Ivshina Yu.V. <i>Calibration of strapdown inertial navigation systems using output signals of error model</i>	95
---	----

УДК 004:046

О.А. Ефремова, С.В. Павлов, А.В. Соколова

**ИНТЕГРАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕГИОНАЛЬНУЮ СИСТЕМУ
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

O.A. Efremova, S.V. Pavlov, A.V. Sokolova

**INTEGRATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS
OF POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS IN REGIONAL SYSTEM
OF INFORMATION DECISION MAKING SUPPORT**

Рассмотрена проблема интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов в Геоинформационную систему органов исполнительной власти Республики Башкортостан. В качестве одного из подходов к ее решению предложена модифицированная схема, учитывающая интеграцию на уровне данных и сервисов. Для выявления более тесных связей между объектами интеграции введено теоретико-множественное описание пространственной информации в составе трехмерной модели потенциально опасного объекта и геоинформационной системы региона в целом. В соответствии с предложенным описанием и схемой интеграции разработан алгоритм и интерфейс работы с трехмерными моделями потенциально опасных объектов в составе Геоинформационной системы органов исполнительной власти Республики Башкортостан.

ИНТЕГРАЦИЯ; ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИНФОРМАЦИЯ; ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ; ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫЙ ОБЪЕКТ; ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ; ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ РЕГИОНОМ.

The article considers the problem of integration of three-dimensional models of potentially dangerous objects in geographic information systems executive agencies of the Bashkortostan Republic. One of solutions this problem is proposed modified integration scheme of three-dimensional models of potentially dangerous objects in Geographic information systems executive agencies of the Bashkortostan Republic, in respect that the integration on data and services levels. To identify closer links between integration objects is introduced a set-theoretic description of the spatial information within the three-dimensional model of a potentially dangerous object and region geographic information systems as a whole. On basis of scheme and description is developed algorithm and interface to work with three-dimensional models of potentially dangerous objects in the Geographic Information System of the executive agencies of the Bashkortostan Republic.

INTEGRATION; SPATIAL INFORMATION; THREE-DIMENSIONAL MODEL; A POTENTIALLY DANGEROUS OBJECT; THE SET-THEORETIC DESCRIPTION; PROVIDING INFORMATION TO REGION DECISION-MAKING SUPPORT.

Республика Башкортостан является одним из крупных, стабильно развивающихся промышленных регионов Российской Федерации, управление которым требует использования информации, характеризующей регион как объект, обладающий природно-географическими, социально-демографическими, экономическими, инфраструктурными и иными характеристиками и особенностями. Учитывая разносторонний характер информации, большой объем и пространственную распределенность на территории региона, ее обработка невозможна без применения современных информационных систем, обеспечивающих сбор, хранение, анализ и графическую визуализацию пространственных данных.

Одной из таких систем является Геоинформационная система органов исполнительной власти Республики Башкортостан (ГИС ОИВ РБ), призванная автоматизировать процессы централизованного хранения, управления и предоставления органам исполнительной власти Республики, отдельным ведомствам, их территориальным подразделениям и предприятиям базовых и специализированных пространственных данных о ее территории и объектах, расположенных на ней, и тем самым обеспечивать информационную поддержку принятия решений по управлению Республикой в целом.

Важным направлением организации такого рода информационной поддержки принятия решений, основанном на том, что на территории Республики расположено большое количество промышленных объектов, представляющих угрозу окружающей среде и населению, является поддержка принятия решений в случае возникновения аварийных или чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Для минимизации временной оценки обстановки на территории аварийного объекта и оперативного принятия решения необходимо иметь наиболее полное представление о территории объекта в удобном для восприятия трехмерном виде. Исследованиям в области разработки различного рода трехмерных моделей посвящены работы

П.И. Пахомова, В.А. Немтинова, С. Златановой, М. Моленаара и др. [5–7].

По требованию Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий многие предприятия, эксплуатирующие объекты, несущие потенциальную угрозу, разработали трехмерные модели с использованием различных современных пакетов трехмерной графики и затем предоставили их в Министерство с целью формирования единого банка трехмерных моделей потенциально опасных объектов. Под потенциально опасными объектами понимаются объекты, на которых используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаро- и взрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения ЧС.

Исходя из того, что процесс поддержки принятия решений по управлению Республикой в случае возникновения различного рода чрезвычайных ситуаций требует предоставления наиболее полной информации об объекте, на котором произошла чрезвычайная ситуация, информацию о таких объектах в трехмерном виде необходимо интегрировать в ГИС ОИВ РБ (рис. 1).

Трехмерная модель потенциально опасного объекта

Трехмерные модели потенциально опасных объектов представляют собой полноценные трехмерные карты, которые позволяют выбирать объекты, входящие в состав модели, с целью запроса информации об объекте, редактировать их внешний вид и характеристики (семантику), определять координаты объектов, выполнять измерительные и расчетные операции, производить детальную оценку местности.

В основе моделей лежат различные картографические материалы: планы городов, космические и аэрофотоснимки, крупномасштабные карты, матрицы высот, растровые изображения и другие материалы, которые могут использоваться как по отдельности, так и совместно.

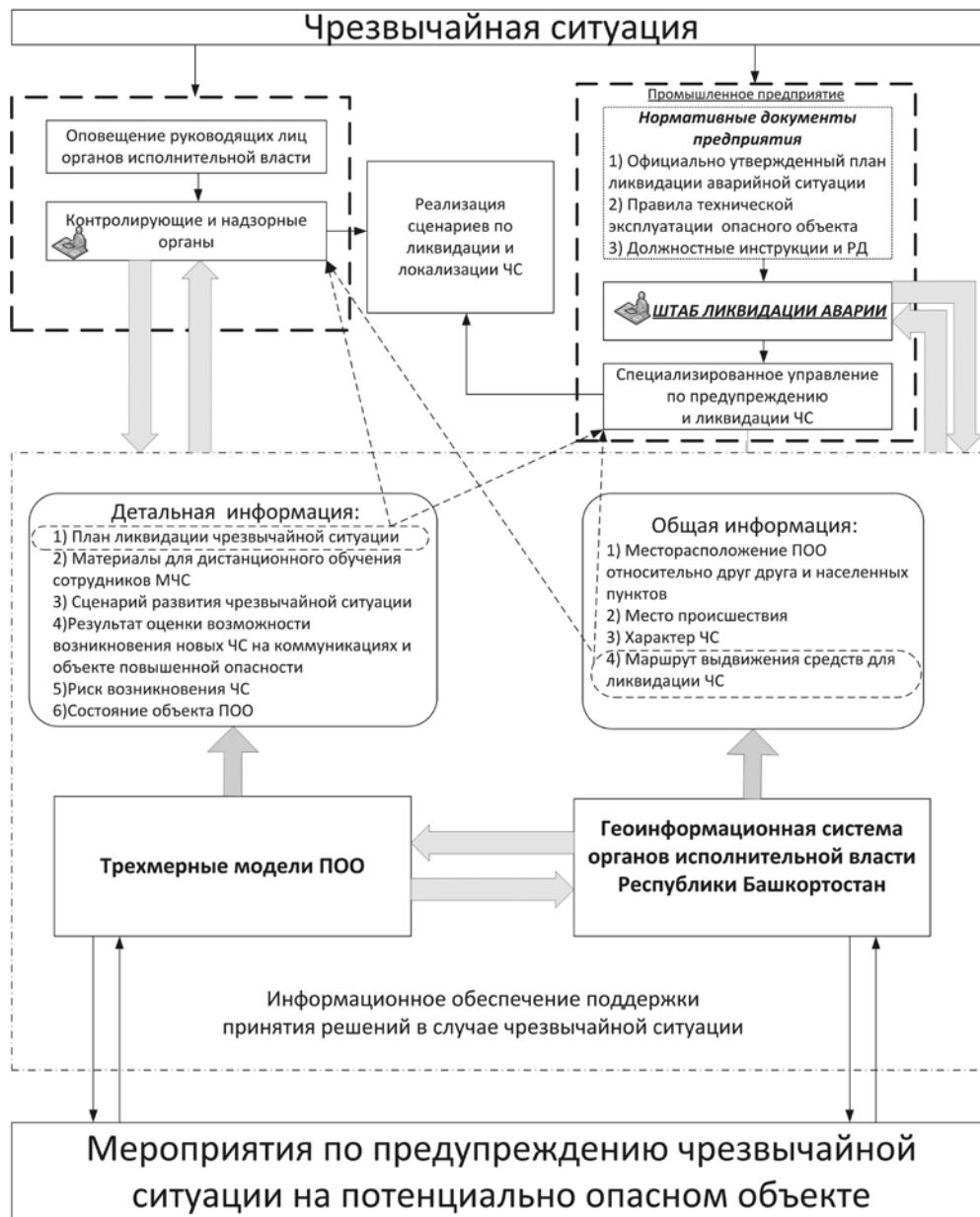


Рис. 1. Схема процесса информационной поддержки принятия решений по управлению Республикой в случае возникновения чрезвычайной ситуации

При этом трехмерная модель потенциально опасного объекта обеспечивает интеграцию информации обо всех видах пространственных объектов, находящихся на его территории, и может быть определена следующим набором элементов:

$$M = \langle D, F, P \rangle, \quad (1)$$

где D – множество пространственных данных об объекте; F – функция преобразова-

ния пространственных данных в трехмерное изображение; P – проект визуализации трехмерной модели.

В свою очередь множество пространственных данных, входящих в состав трехмерной модели потенциально опасного объекта, можно описать следующим образом [1]:

$$D = \langle V, R, T \rangle, \quad (2)$$

где V – векторные данные, хранящиеся в

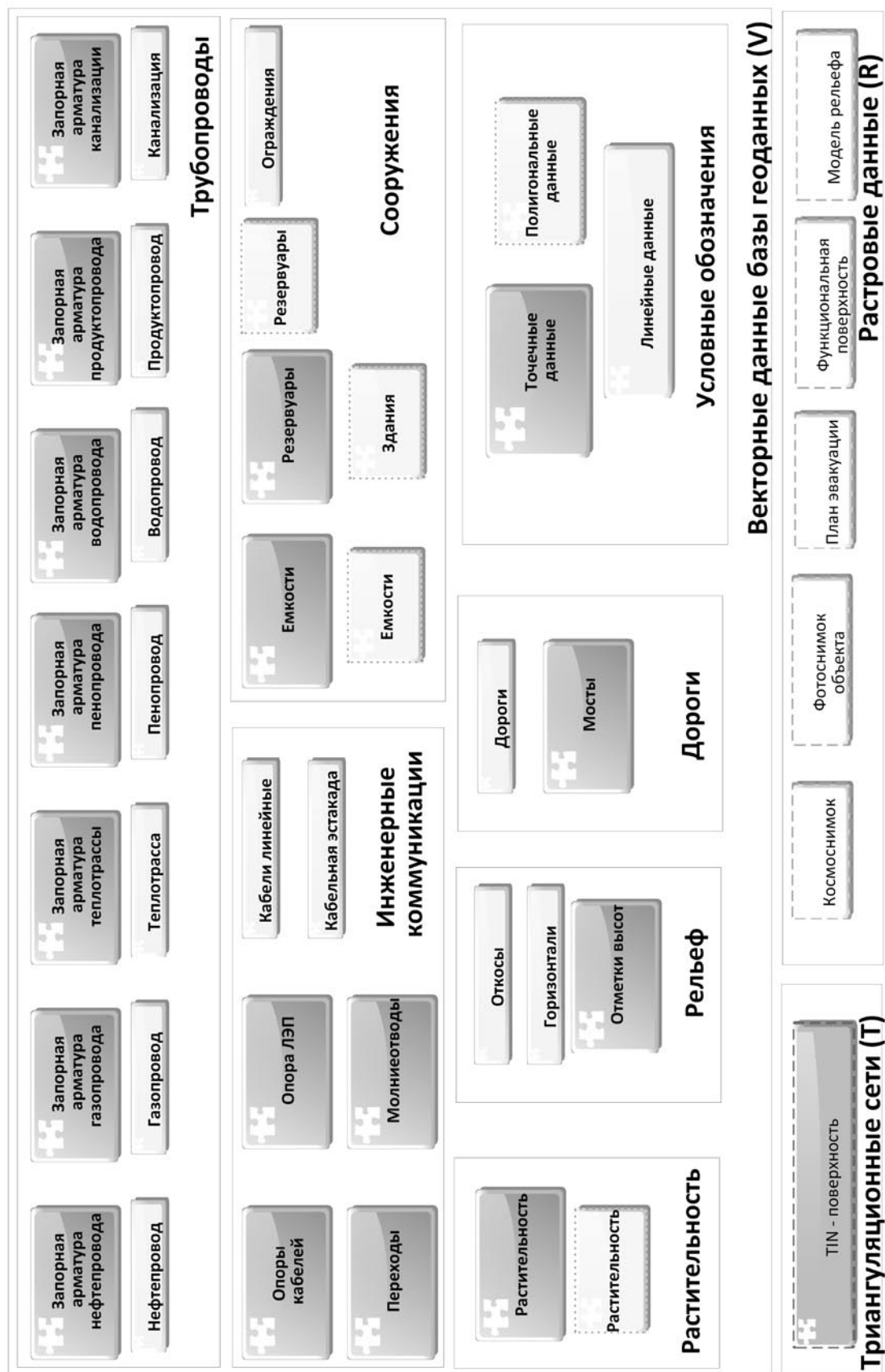


Рис. 2. Укрупненная информационная модель трехмерной модели потенциально опасных объектов в нотации BPMN



базе геоданных и описывающие информацию о трехмерных объектах, расположенных на территории потенциально опасного объекта (коммуникации, сооружения, рельеф и др.); R – растровые данные (космические снимки территории, планы эвакуации и др.); T – данные о поверхности земли, хранящиеся в виде триангуляционных сетей.

Более детальное описание множества пространственных данных в составе трехмерной модели потенциально опасного объекта может быть представлено средствами методологии функционального и информационного моделирования процессов в нотации BPMN (рис. 2).

Так как на территории Республики расположено некоторое множество t объектов, несущих потенциальную угрозу, то совокупность трехмерных моделей потенциально опасных объектов можно описать следующим соотношением:

$$U = \bigcup_{i=1}^t M_i, \quad (3)$$

где U – множество трехмерных моделей потенциально опасных объектов, расположенных на территории Республики; M_i – трехмерная модель i -го потенциально опасного объекта; t – общее количество потенциально опасных объектов на территории Республики.

Введенное, таким образом, описание множества трехмерных моделей позволяет перейти к формализации процесса интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов в Геоинформационную систему органов исполнительной власти Республики Башкортостан.

**Интеграция трехмерных моделей
потенциально опасных объектов в состав
Геоинформационной системы органов
исполнительной власти Республики
Башкортостан**

В Геоинформационной системе органов исполнительной власти Республики Башкортостан, как отмечалось в [3, 4], осуществляется обработка и визуализация пространственной информации, подразделяющейся на базовую информацию о тер-

ритории Республики и специализированную информацию органов исполнительной власти, которая может храниться как в каталоге ресурсов системы (хранилище ГИС ОИВ РБ), так и в различных собственных информационных системах органов исполнительной власти региона.

В целом структура Геоинформационной системы органов исполнительной власти Республики Башкортостан может быть описана следующим образом [2]:

$$S = \langle D, A \rangle, \quad (4)$$

где D – множество пространственных данных; A – множество сервисов обработки пространственных данных.

Все множество пространственных данных D может быть представлено соотношением:

$$D = B \cup E, \quad (5)$$

где B – совокупность базовых пространственных данных о территории Республики Башкортостан, доступных широкому кругу пользователей; E – совокупность специализированных баз данных всех органов исполнительной власти, которые в свою очередь подразделяются на K – совокупность пространственных данных всех органов исполнительной власти, создаваемых средствами собственных информационных систем и хранимых в них, и Z – совокупность специализированных пространственных данных всех органов исполнительной власти, создаваемых средствами ГИС ОИВ РБ и хранимых в ее каталоге ресурсов, то есть

$$E = K \cup Z. \quad (6)$$

В свою очередь для K и Z выполняются, соответственно, следующие соотношения:

$$K = \bigcup_{j=1}^l K_j, \quad (7)$$

где K_j – специализированные пространственные данные j -го органа власти; l – количество органов исполнительной власти, имеющих собственные ГИС;

$$Z = \bigcup_{k=1}^m Z_k, \quad (8)$$

где Z_k – специализированные простран-

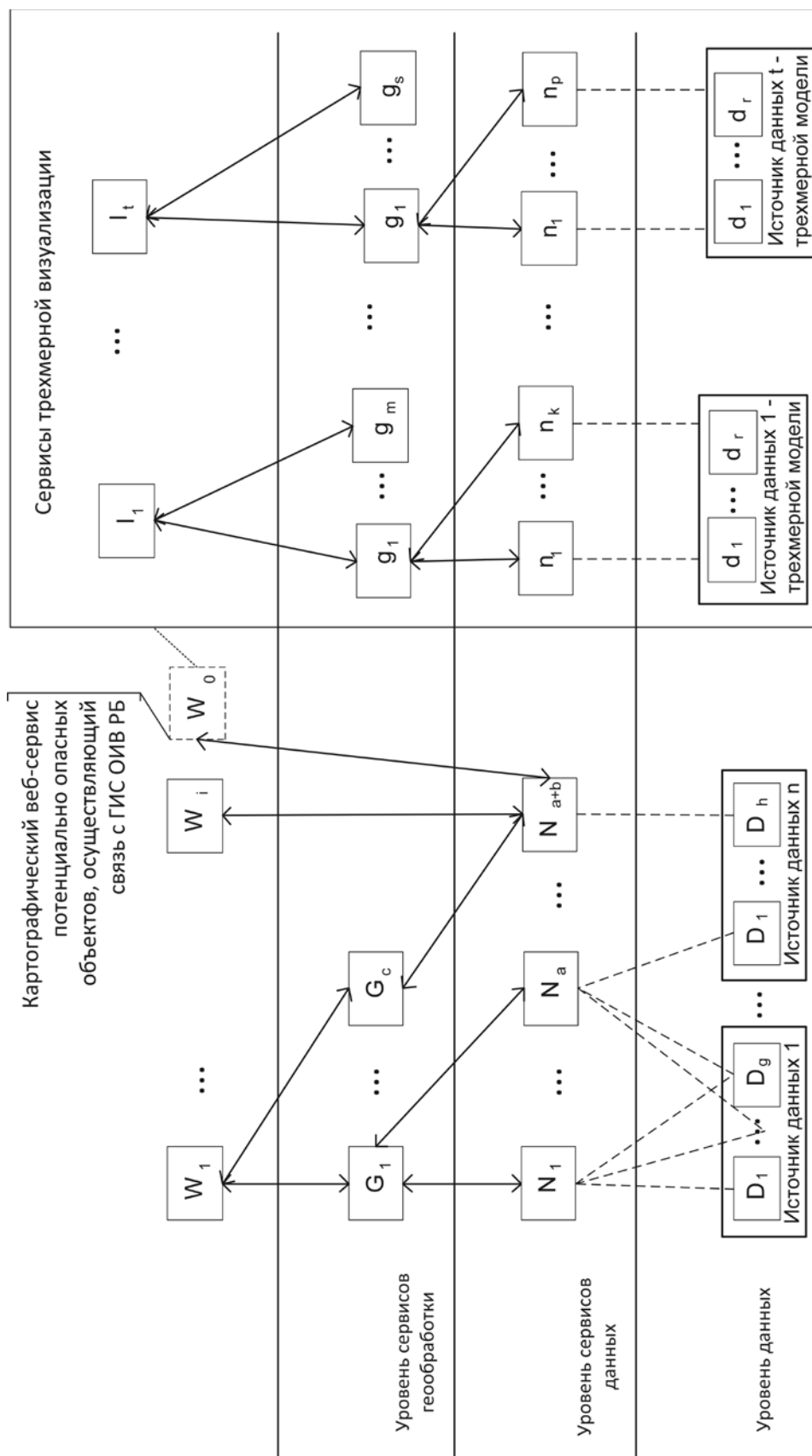


Рис. 3. Схема интеграции трехмерных моделей в ГИС ОИВ РБ



ственные данные k -го органа власти, а m — количество органов исполнительной власти, использующих для создания специализированных пространственных данных средства ГИС ОИВ РБ.

При интеграции в Геоинформационную систему органов исполнительной власти Республики Башкортостан трехмерных моделей потенциально опасных объектов множество пространственных данных в составе ГИС ОИВ РБ (соотношение (5)) должно быть расширено и описано следующим соотношением:

$$D = B \cup E \cup I, \quad (9)$$

где I — множество пространственных данных о потенциально опасных объектах, расположенных на территории Республики, которые представляют собой совокупность вида

$$I = \bigcup_{i=1}^t D_i, \quad (10)$$

где D_i — пространственные данные о i -м потенциально опасном объекте, представленные в виде (2); t — количество потенциально опасных объектов, расположенных на территории Республики.

Исходя из сказанного выше, соотношение (5) может быть представлено как

$$D = B \cup E = B \cup K \cup Z \cup I. \quad (11)$$

Таким образом, за счет выполнения (11) будет осуществлена интеграция трехмерных моделей потенциально опасных объектов в ГИС ОИВ РБ на уровне данных.

Для осуществления интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов в Геоинформационную систему органов исполнительной власти Республики Башкортостан на уровне приложений

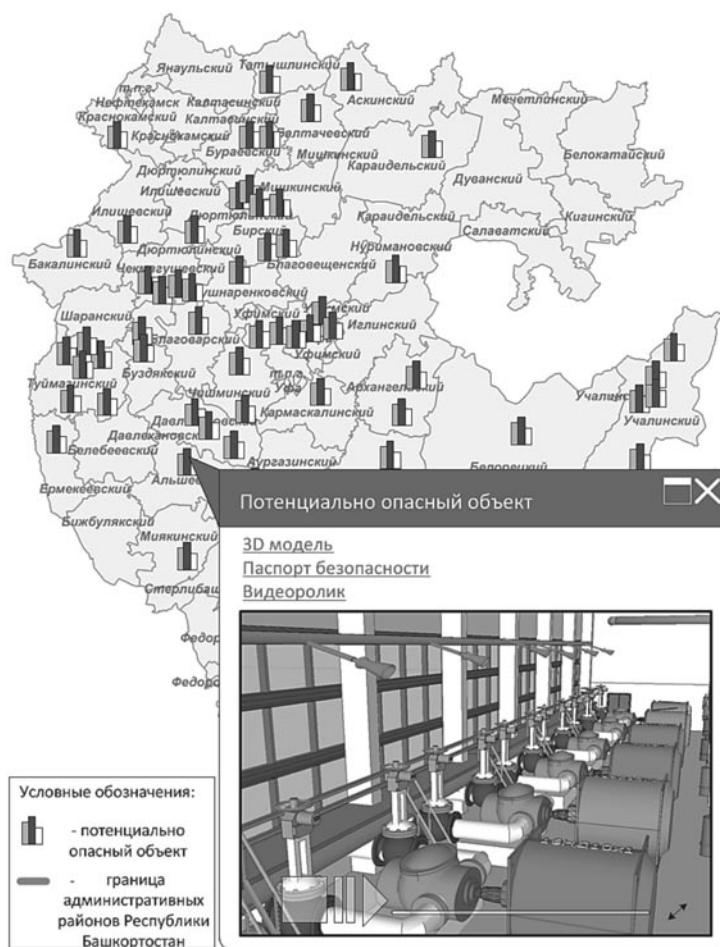


Рис. 4. Пример включения трехмерных моделей потенциально опасных объектов в ГИС ОИВ РБ

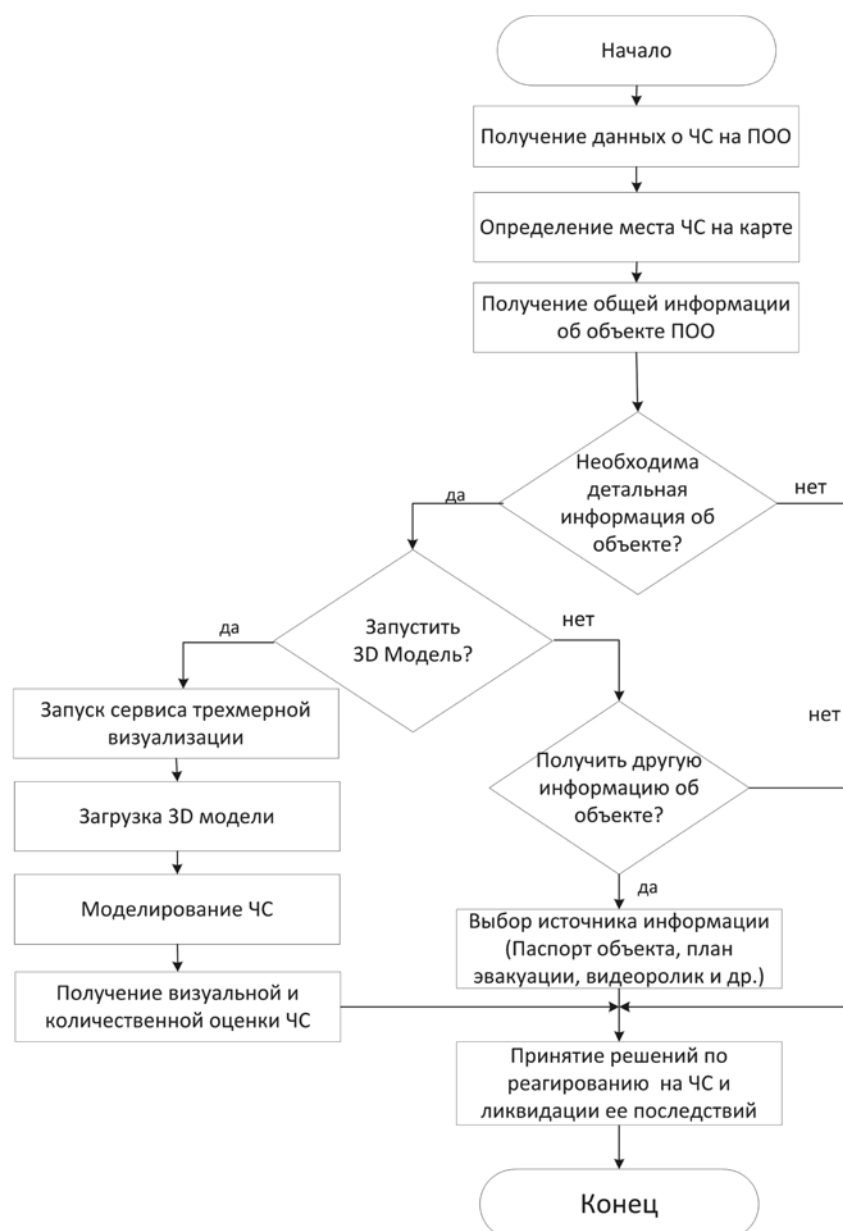


Рис. 5. Алгоритм использования интегрированных трехмерных моделей ПОО для обеспечения информационной поддержки принятия решений в случае возникновения ЧС и ликвидации ее последствий

(сервисов), для каждой интегрируемой базы данных должен быть разработан свой сервис данных N , набор сервисов геообработки G и картографических веб-сервисов W [3].

Интеграция трехмерных моделей потенциально опасных объектов в ГИС ОИВ РБ может быть осуществлена за счет разработки дополнительного сервиса L – сервиса трехмерной визуализации, представляющего собой множество кодов источников

пространственных данных трехмерных моделей потенциально опасных объектов C_L и множество характеристик сервиса H_L :

$$L = \{C_L, H_L\}. \quad (12)$$

Тогда, в соответствии с (4), множество сервисов обработки пространственных данных A может быть представлено в следующем виде:

$$A = \langle N, G, W, L \rangle. \quad (13)$$



В соответствии с введенным описанием (13) доработана предложенная в [3] схема интеграции пространственной информации, представленная на рис. 3, позволяющая интегрировать разработанные трехмерные модели потенциально опасных объектов в ГИС ОИВ РБ для обеспечения информационной поддержки принятия решения в случае возникновения ЧС и ликвидации ее последствий на территории Республики.

Пример интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов в ГИС ОИВ РБ

Пример интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов, расположенных на территории Республики Башкортостан, в ГИС ОИВ РБ приведен на рис. 4.

Для организации непосредственного доступа к трехмерным моделям на сервере системы опубликованы сервисы трехмерной визуализации, позволяющие предоставить геоинформационные ресурсы в трехмерном виде по сети Интернет/Инtranет и с помощью клиентского приложения включить модели в интерфейс Геоинформационной системы органов исполнительной власти Республики Башкортостан (независимо от среды их разработки). Также в составе ГИС ОИВ РБ на двухмерную карту территории Республики нанесен точечный слой «Трехмерные модели потенциально опасных объектов», включающий в себя информацию о месте расположения потенциально опасных объектов на территории Республики и обеспечивающий доступ к выбранной на карте трехмерной модели. Алгоритм использования интегрированных в ГИС ОИВ РБ трехмерных моделей ПОО для обеспечения информационной поддержки принятия решений в

случае возникновения ЧС и ликвидации ее последствий представлен на рис. 5.

Предложенная схема интеграции трехмерных моделей позволила осуществить пространственную привязку трехмерных моделей потенциально опасных объектов к электронной карте Республики Башкортостан, организовать многопользовательский доступ к ним посредством веб-интерфейса без установки специального оборудования на рабочих местах специалистов, принимающих решения, и тем самым расширить функциональность информационного обеспечения процесса поддержки принятия решений по управлению Республикой.

Предложено решение проблемы интеграции трехмерных моделей потенциально опасных объектов в разработанную на основе сервис-ориентированной архитектуры Геоинформационную систему органов исполнительной власти Республики Башкортостан, для чего введено теоретическое множество описание всей пространственной информации и разработана модифицированная схема интеграции разнородной пространственной информации в ГИС ОИВ РБ.

На основе полученных результатов разработаны алгоритм и интерфейс работы с трехмерными моделями потенциально опасных объектов в составе Геоинформационной системы органов исполнительной власти Республики Башкортостан, что позволит сократить время и увеличить точность принимаемых решений в случае возникновения чрезвычайной ситуации за счет предоставления полного объема необходимой информации о ее развитии в более наглядном и доступном для понимания виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин А.Р., Соколова А.В. Трехмерное моделирование инженерных коммуникаций в ГИС // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвуз. научн. сб. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2013. С. 176–185.
2. Павлов С.В., Ефремова О.А., Павлов А.С. Информационная вычислительная система для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными // Элек-

тротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 2. С. 88–95.

3. Павлов С.В., Ефремова О.А., Ямалов И.У. Интеграция пространственной информации в Геоинформационной системе органов исполнительной власти на основе сервис-ориентированной архитектуры // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 5(58). С.129–139.

4. Павлов С.В., Ефремова О.А., Соколова А.В. Формализованное описание пространствен-

ной информации в составе трехмерных моделей потенциально опасных объектов на основе теоретико-множественного подхода // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2014. Т. 10. № 1. С. 66–72.

5. **Пахомов П.И., Немтинов В.А.** Геоинформационная модель территории для поддержки принятия решений по управлению объектами коммунальных систем // *Вестник Тамбовского*

государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 1. С. 199–207.

6. **Billena R., Zlatanova S.** 3D spatial relationships model: a useful concept for 3D cadastre? // *Proceedings of EGIS'90*. 1990. Vol. 2. No. 4. Pp. 411–425.

7. **Molenaar M.** A formal data structure for 3D vector maps // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2003. Vol. 27. Pp. 770–781.

REFERENCES

1. **Gizatullin A.R., Sokolova A.V.** Trekhmernoye modelirovaniye inzhenernykh kommunikatsiy v GIS, *Geoinformatsionnyye tekhnologii v proyektirovani i sozdani korporativnykh informatsionnykh sistem: mezhvuz. nauchn. sb.* Ufa: UGATU Publ., 2013. Pp. 176–185. (rus)

2. **Pavlov S.V., Yefremova O.A., Pavlov A.S.** Informatsionnaya vychislitelnaya sistema dlya obespecheniya organov ispolnitelnoy vlasti regiona prostanstvennyimi dannymi, *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy*, 2013, Vol. 9, No. 2, Pp. 88–95. (rus)

3. **Pavlov S.V., Yefremova O.A., Yamalov I.U.** Integratsiya prostanstvennoy informatsii v Geoinformatsionnoy sisteme organov ispolnitelnoy vlasti na osnove servis-oriyentirovannoy arkhitektury, *Vestnik UGATU*, 2013, Vol. 17, No. 5(58), Pp. 129–139. (rus)

4. **Pavlov S.V., Yefremova O.A., Sokolova A.V.**

Formalizovannoye opisaniye prostanstvennoy informatsii v sostave trekhmernykh modeley potentsialno opasnykh obyektov na osnove teoretiko-mnozhestvennogo podkhoda, *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy*, 2014, Vol. 10, No. 1, Pp. 66–72. (rus)

5. **Pakhomov P.I., Nemtinov V.A.** Geoinformatsionnaya model territorii dlya podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu obyektami kommunalnykh sistem, *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, Vol. 15, No. 1, Pp. 199–207. (rus)

6. **Billena R., Zlatanova S.** 3D spatial relationships model: a useful concept for 3D cadastre? *Proceedings of EGIS'90*, 1990, Vol. 2, No. 4, Pp. 411–425.

7. **Molenaar M.** A formal data structure for 3D vector maps, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2003, Vol. 27, Pp. 770–781.

ЕФРЕМОВА Оксана Александровна — докторант кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук.

450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

E-mail: efremova-oa@yandex.ru

EFREMOVA, Oksana A. *Ufa State Aviation Technical University.*

450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

E-mail: efremova-oa@yandex.ru

ПАВЛОВ Сергей Владимирович — профессор кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук.

450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

E-mail: psvgis@mail.ru

PAVLOV, Sergey V. *Ufa State Aviation Technical University.*

450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

E-mail: psvgis@mail.ru

СОКОЛОВА Анна Васильевна — аспирант кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

E-mail: beldyanova@ya.ru

SOKOLOVA, Anna V. *Ufa State Aviation Technical University.*

450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

E-mail: beldyanova@ya.ru



УДК 004.7

А.В. Самочадин, Т.Н. Самочадина, Д.А. Тимофеев, С.О. Попов

БАЗОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

A.V. Samochadin, T.N. Samochadina, D.A. Timofeev, S.O. Popov

BASE FEATURES OF MOBILE DEVICE MANAGEMENT SYSTEMS

Проведен анализ функциональности систем централизованного управления мобильными устройствами, которая реализуется ведущими производителями в этой области. Результатом анализа является выделение базового набора функций, необходимого для реализации конкурентного решения по управлению мобильными устройствами, а также идентификация функций, реализация которых может дать преимущество перед конкурентами.

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ; ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ; ТРЕБОВАНИЯ.

We survey feature sets of main mobile device management systems on the market. All features are split into 7 categories: mobile platform support, hosting mode, policy management, inventory management, device state management, security management, software distribution. For each category, we identify the features that are implemented in most MDM systems. These features must be implemented in any new mobile device management system that is supposed to compete with current market leaders' software. The analysis also showed that there is a set of features (namely, device location discovery, and remote access to equipment) that are desired, yet underrepresented in mobile device management software, so implementation of these features may become an advantage.

MOBILE DEVICE MANAGEMENT; FEATURES; REQUIREMENTS.

Мобильные технологии активно внедряются в различные отрасли бизнеса. Компании видят в мобильных технологиях средства повышения производительности сотрудников и, как следствие, приобретения конкурентных преимуществ на рынке. Наиболее перспективными отраслями для внедрения мобильных технологий являются те, бизнес в которых предполагает мобильность сотрудников или связан с массовым обслуживанием клиентов: торговые, страховые компании, образовательные учреждения, дистрибьюторы. Аналитики прогнозируют во всем мире 30–35-процентный рост числа сотрудников, использующих мобильные технологии в своей производственной деятельности. Количество пользователей современных интеллектуальных мобильных устройств в России очень велико, и это позволяет ожидать высокую динамику внедре-

ния мобильных технологий в ближайшее время. Основным подходом к внедрению мобильных технологий сегодня является использование централизованного управления мобильными устройствами (MDM).

Исследования, проведенные 451 Research (The 451 Group) [1], показали, что технологии централизованного управления мобильными устройствами входят в число трех наиболее востребованных и быстро растущих информационных технологий. Исследовательская и консалтинговая компания Gartner [2] также относит управление мобильными устройствами к числу десяти наиболее перспективных технологий. Объем рынка MDM-решений в 2010 г. составил 150 млн [3], в 2011 — 444,6 млн долларов США [4, 5]. Согласно данным Gartner [6], объем рынка оценивался в 784 млн в 2012 и более чем в один млрд долларов США в

2013 г. В целом, рынок MDM-решений показал очень высокий рост в 2011 г., увеличившись почти в три раза, после чего стабильно рос более чем на 50 % в год. Число компаний, использующих MDM-решения, растет пропорционально объему рынка [7].

Чрезвычайно благоприятны для рынка MDM-решений и прогнозы на ближайшие годы, которые выполнялись ведущими консалтинговыми компаниями Gartner, IDC, The Radicati Group, Mind Commerce. Все они прогнозируют в 2014–2016 гг. рост рынка на 20–35 % в год. Ожидается и соответственный рост числа пользователей MDM. Согласно данным Mind Commerce [8], в начале 2014 г. их число составляет 180 млн, а к 2015 г. должно увеличиться до 390 млн человек.

В Российской Федерации отсутствуют собственные полнофункциональные решения в области управления мобильными устройствами, поэтому актуально создание конкурентоспособного программного продукта отечественного производства. Конкурентоспособность разрабатываемого программного обеспечения по сравнению с зарубежными аналогами должна быть обеспечена улучшенными функциональными, потребительскими и стоимостными показателями продукции.

Рынок MDM в современном состоянии классифицируется как незрелый [2], с быстро растущим количеством поставщиков и появлением новых вариантов технологических решений. Функциональность представленных на рынке систем пока не устоялась и отличается большим разнообразием. Лидирующая группа производителей старается включать в свои продукты функциональность, которая имеется у конкурентов, поэтому функциональные возможности решений лидеров рынка отличаются друг от друга меньше, чем у производителей второго эшелона.

Задачей настоящей работы было выделение основных функций управления мобильными устройствами, которые должны быть реализованы в системе MDM, чтобы она могла составить конкуренцию лучшим из представленных на рынке MDM решений. При этом мы опирались на два кри-

терия. Первым из них является доля коммерческих решений, в которых реализована каждая из функций. Отсутствие возможностей, предоставляемых большей частью других реализаций, снижает конкурентоспособность системы. Вторым критерием является степень заинтересованности конечных пользователей в сервисах, которые строятся на основе базовых функций системы MDM. В первую очередь необходимо реализовывать те функции, которые нужны для разработки наиболее востребованных сервисов. Оценки степени заинтересованности пользователей, использованные в данной статье, были получены в результате опроса [9].

Основные производители менеджеров мобильных устройств. На рынке менеджеров мобильных устройств активно работают более 100 поставщиков, поставляющих различные варианты решений [10], из которых 39 выделены в обзорах ведущих консалтинговых компаний (Gartner [10], Solutions Review [11], Forester [12]) как лидеры рынка. Для подробного рассмотрения мы отобрали следующие 20 производителей, которые упоминаются не менее чем в двух обзорах ведущих консалтинговых компаний: Absolute Software (<https://www.absolute.com>), AirWatch (<http://www.air-watch.com>), AmTel (<http://www.amtelnet.com>), Boxtone (<http://boxtone.com>), Citrix (<http://www.citrix.com>), Excitor (<http://www.excitor.com>), Fiberlink (MaaS360) (<http://www.maas360.com>), Good Technology (<http://www1.good.com>), IBM (<http://www-03.ibm.com>), Kaseya (<http://www.kaseya.com>), LANDesk (<http://www.landesk.com>), McAfee (<http://www.mcafee.com>), MobileIron (<http://www.mobileiron.com>), Notify Technology (Globo) (<http://www.globopl.com>), Sophos (<http://www.sophos.com>), SOTI (<http://www.soti.net>), Sybase (<http://www.sybase.ru>), Symantec (<http://www.symantec.com>), Tangoe (<http://www.tangoe.com>), Trend Micro (<http://www.trendmicro.com.ru>). Источниками информации о предлагаемых ими решениях являются обзоры рынков [10–14] и сведения, опубликованные на сайтах производителей.

Функциональность решений MDM. Со-

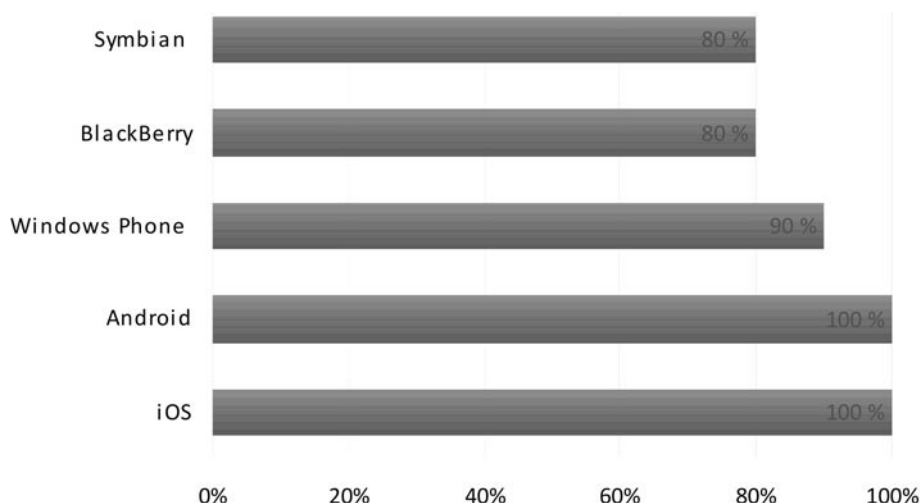


Рис. 1. Поддерживаемые мобильные платформы

гласно Gartner [12], MDM определяется как спектр продуктов и услуг, которые предоставляют организациям возможность развертывать и поддерживать различные корпоративные приложения на мобильных устройствах.

На основе обзоров консалтинговых компаний [11, 13] и анализа различных решений были выделены семь категорий (направлений функциональности), каждая из которых разбивается на подкатегории. На основании этой классификации проводится анализ решений, предоставляемых основными производителями.

Ключевыми категориями, на базе которых проводится оценка представленных на рынке решений, являются поддерживаемые мобильные платформы, способы поставки, применение политик, управление инвентаризацией, управление состоянием мобиль-

ных устройств, управление безопасностью и управление распространением приложений.

Поддерживаемые мобильные платформы. Все производители поддерживают лидирующие на рынке мобильных платформ системы iOS и Android (рис. 1). Большинство производителей поддерживают Windows Phone, при этом за 2013 г. доля поддерживающих эту платформу решений резко выросла. Следует также отметить снижение доли поддержки BlackBerry и Symbian, связанное с быстрым падением популярности этих платформ на рынках смартфонов и планшетов. Согласно прогнозам аналитических компаний, в ближайшие три-четыре года распределение выпускаемых мобильных устройств по операционным системам будет выглядеть следующим образом: Android — первое место с большим отрывом,

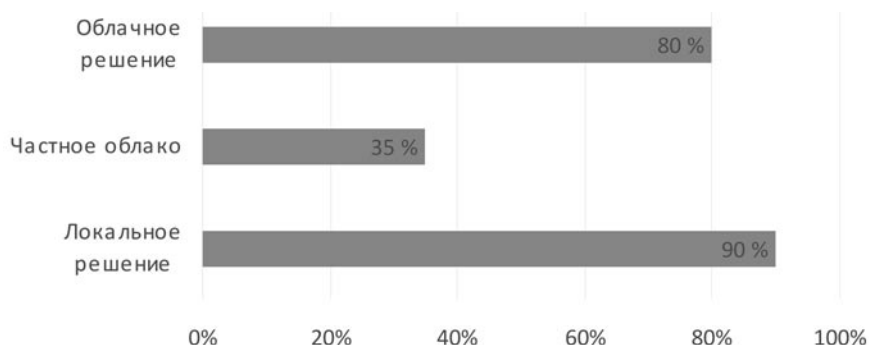


Рис. 2. Способы поставки

iOS и Windows Phone — второе и третье место с очень небольшой разницей. Суммарная доля рынка трех указанных мобильных платформ составит более 90 %. Операционные системы Symbian, Asha, BlackBerry, Bada будут занимать очень небольшую долю мирового и российского рынка (1–3 %), поэтому поддержка этих мобильных платформ в разрабатываемых решениях MDM не является необходимой.

Используемые способы поставки. Производители предлагают следующие способы поставки решений MDM (рис. 2):

- Локальное решение. В этом случае поставляется локальное программное обеспечение, которое разворачивается с использованием инфраструктуры организации покупателя.
- Облачное решение. Программное обеспечение MDM размещается в облачной среде поставщика, а заказчику предоставляется удаленный доступ к системе MDM.
- Частное облако — облачное решение, которое передается заказчику и размещается в «частном облаке» под его контролем.

Локальное решение является традиционным способом поставки и поддерживается всеми производителями. Среди других способов поставки наиболее востребованы облачные решения, поскольку они позволяют организациям получить возможности MDM без начальных инвестиций в инфраструктуру.

Применение политик. Чтобы мобильное устройство было доступно для удаленного управления, оно должно пройти процедуру инициализации устройства на сервере MDM. В процессе инициализации на устройство устанавливается MDM-профиль, содержащий настройки политик безопасности и другую конфигурационную информацию (рис. 3).

Производители предлагают следующие способы установки настроек и ограничений мобильного устройства:

- инициализация с помощью средств управления конфигурацией;
- инициализация через портал самообслуживания.

Оба способа являются востребованны-

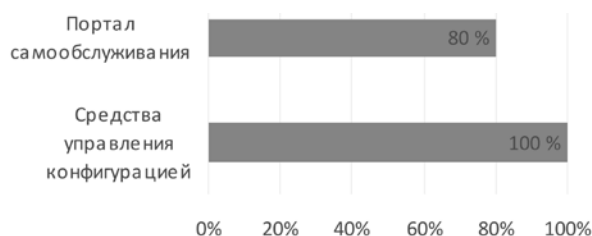


Рис. 3. Применение политик

ми и поддерживаются практически всеми реализациями MDM.

Управление инвентаризацией. Инвентаризация подключенных к корпоративной сети мобильных устройств является одной из основных функций MDM (рис. 4). Процесс инвентаризации мобильных устройств включает периодическое получение от мобильных устройств информации об их программно-технических характеристиках (ПТХ) и местоположении, и накопление этой информации в едином реестре.

Инвентаризация устройств должна предоставлять данные для решения следующих задач:

мониторинг ПТХ, включая отслеживание ПТХ мобильных устройств и обнаружение устройств, нарушающих требования назначенных групповых политик;

отслеживание местоположения мобильного устройства;

применение групповых политик управления мобильными устройствами, зависящих от физического местоположения мобильного устройства;

мониторинг памяти и срока службы батареи путем отслеживания использования соответствующих ресурсов мобильных устройств;

построение инвентаризационных отчетов;

администрирование и формирование административных отчетов.

Следует отметить, что представленные на рынке решения в наименьшей степени поддерживают функции, связанные с местоположением пользователей.

Управление состоянием устройств. Под управлением состоянием устройств по-

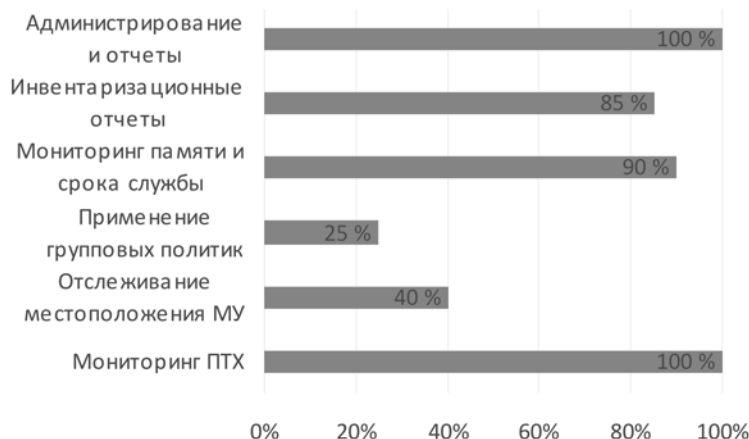


Рис. 4. Инвентаризация мобильных устройств

нимаются действия, приводящие к блокировке, разблокировке и восстановлению заводских настроек мобильных устройств. Эти действия могут выполняться как администраторами MDM, так и пользователями устройств самостоятельно. Производители систем MDM предлагают следующие способы управления состоянием мобильных устройств (рис. 5).

- Дистанционная блокировка /разблокировка мобильных устройств. При необходимости (например, при краже или потере устройства) мобильное устройство можно удаленно заблокировать. Связь с устройством возможна даже в случае замены SIM-карты. Функция отслеживания

SIM-карты обнаруживает смену SIM-карты в устройстве, сообщает MDM новый номер телефона и позволяет применить все меры защиты на случай кражи.

- Дистанционная блокировка и разблокировка сенсоров мобильных устройств (микрофон, видеокамера).

- Обнаружение мобильных устройств, которые в течение длительного времени не выходили на связь с системой MDM.

- Восстановление данных утерянного устройства.

- Блокировка аппаратных возможностей.

Все функции управления состоянием устройства (за исключением восстано-



Рис. 5. Управление состоянием устройств

ния данных утерянного телефона) включаются в функциональность практически всех систем MDM.

Управление безопасностью. К основным угрозам безопасности [15] относятся вредоносное программное обеспечение, взлом мобильных устройств, хищение или потеря мобильных устройств, случайная утечка данных, преднамеренное распространение данных сотрудниками организации. Основными мерами защиты являются [15] использование средств защиты от вредоносного программного обеспечения, регулярная установка обновлений, разграничение уровней доступа к ИТ-системам, политика послеаварийного восстановления и шифрование конфиденциальных данных.

Необходимый уровень защиты обеспечивается в системах MDM с помощью следующего набора функций управления безопасностью (рис. 6), которые являются практически обязательными для MDM.

- Политика применения паролей, которая включает следующие возможности:

- контроль доступа пользователей к данным, устройствам и приложениям, контроль сетевых подключений;

- возможность удаленно включать использование пароля на устройствах пользователей, устанавливать сертификаты безопасности;

- возможность настройки различных аспектов политики применения паролей, таких как ограничения на использование приложений и ресурсов, применение их к определенным группам, пользователям, устройствам.

- Выборочное удаленное стирание: возможность стереть с устройства корпоративные данные, оставив личные данные пользователя нетронутыми.

- Полное удаление всех данных: возможность при необходимости удалить корпоративные данные с устройства и вернуть его заводские настройки.

- Обнаружение взломанных или модифицированных устройств.

- Контроль соблюдения требований: возможность разрешать использование только тех устройств, которые отвечают заданным требованиям к состоянию устройства (отсутствие взлома и наличие шифрования), состоянию пользователя (его членство в группе) или состоянию приложений (наличие обязательных приложений

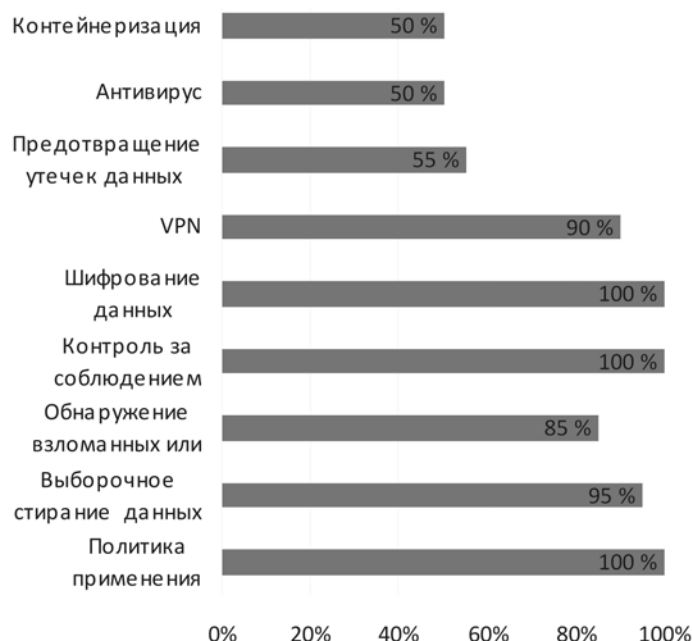


Рис. 6. Управление безопасностью



и отсутствие запрещенных приложений). Если устройство не соответствует требованиям, пользователю обычно предоставляются инструкции по настройке устройства.

- **Шифрование данных:** шифрование всех или некоторых данных на устройстве и, возможно, сменных носителях.

- **Организация подключения VPN** для защищенного удаленного доступа к корпоративным ресурсам.

Следующие функции применяются существенно реже и не являются обязательными функциями MDM.

- **Предотвращение утечек данных.** В то время как меры защиты данных в первую очередь направлены на предотвращение несанкционированного доступа к данным, средства обнаружения утечек предназначены для сокращения ущерба от умышленных действий авторизированных пользователей.

- **Антивирусная защита:** установка и обновление программного обеспечения для защиты от вредоносных приложений.

Новым, перспективным подходом к обеспечению безопасности является контейнеризация, представляющая собой набор механизмов для разделения корпоративных и личных данных и приложений на устройствах. Эта технология позволяет осуществлять контроль и защиту данных в контейнере, ограничивать операции перемещения данных в незащищенные области и предотвращать их извлечение из контей-

нера. Например, можно гарантировать, что защищенные данные не будут отправлены с устройства с помощью сторонних программ электронной почты или SMS. К контейнеру могут применяться такие правила, как локальное шифрование данных, выборочное удаленное стирание, предотвращение утечки данных. Невысокий процент включения этой функции в MDM-решения связан с относительно недавним ее появлением.

Управление распространением приложений. Управление распространением приложений позволяет решить две основные задачи: автоматизировать установку и обновление приложений, необходимых для выполнения должностных обязанностей сотрудника, и обеспечение безопасности путем оперативного распространения обновлений и ограничения на установку сторонних приложений.

Производители предлагают следующие возможности распространения программного обеспечения (рис. 7).

- **Дистанционное автоматическое распространение и обновление программного обеспечения.**

- **Белый и черный списки приложений.** Белый список приложений дает возможность установки на устройство только одобренных приложений. Черный список ограничивает доступ к нежелательным или потенциально вредным приложениям.

- **Ограничение доступа к общедоступным магазинам приложений.** В целях обе-

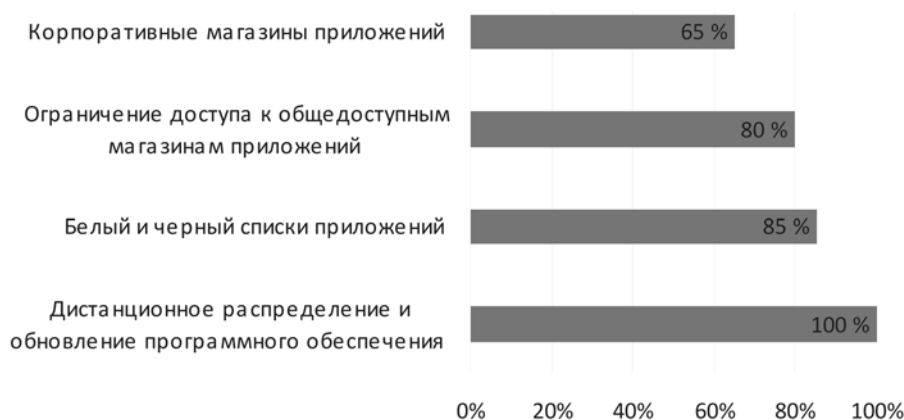


Рис. 7. Управление распространением приложений

спечения безопасности и повышения производительности труда предоставляется возможность ограничения доступа к приложениям в общедоступных магазинах. Доступ при этом возможен только к разрешенным приложениям.

- Корпоративные магазины приложений. Магазины позволяют пользователям получить доступ ко всем мобильным инструментам, необходимым для выполнения их работы.

Наиболее распространенными являются функции дистанционного распространения и обновления программного обеспечения и поддержка белого и черного списков приложений. Поддержка корпоративных магазинов приложений для платформ iOS и Windows Phone реализована производителями самих этих мобильных платформ.

Минимальная функциональность MDM. Функциональность решений, предлагаемых производителями MDM, отличается большим разнообразием, однако можно выделить следующий набор функций, который поддерживается всеми ведущими производителями.

- Поддерживаемые мобильные платформы: Android, iOS, Windows Phone.

- Способы поставки: локальное решение, облачное решение.

- Применение политик: средства управления конфигурацией, портал самообслуживания.

- Управление инвентаризацией: мониторинг ПТХ, отслеживание местоположения мобильных устройств и применение групповых политик на основе местоположения, инвентаризационные административные отчеты.

- Управление состоянием мобильных устройств: блокировка устройств, блокировка сенсоров.

- Управление безопасностью: политика применения паролей, выборочное стирание данных, обнаружение взломанных или модифицированных устройств, шифрование данных, VPN, предотвращение утечек данных, контейнеризация.

- Управление распространением при-

ложений: дистанционное распределение и обновление ПО, белый и черный списки приложений.

Отсутствие функций из приведенного списка ухудшит конкурентоспособность решения, поэтому они должны быть реализованы и в разрабатываемой системе MDM.

Реализация востребованных пользовательских сервисов. Реализация функций, соответствующих минимальному набору, будучи необходимой, тем не менее не обеспечивает сама по себе конкурентных преимуществ. Чтобы сделать разрабатываемую систему привлекательной для клиентов, необходимо предложить решение для определенного класса задач, который представлял бы значительный интерес для пользователей мобильных устройств, но в то же время не имел бы широкой поддержки в продуктах ведущих производителей систем MDM.

Для анализа востребованности мобильных сервисов, которые могут быть реализованы на основе системы MDM, в 2014 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете было проведено анкетирование [9], в котором приняли участие студенты, преподаватели и представители администрации Университета. Выбор аудитории был обусловлен тем, что, в соответствии с целями проекта, сфера образования должна стать одной из основных областей применения разрабатываемой системы.

Большая часть сервисов, которые по результатам опроса были сочтены востребованными, может быть реализована на основе существующих систем MDM. Тем не менее были выделены два класса сервисов, которые представляют существенный интерес для пользователей мобильных устройств, но недостаточно поддерживаются системами MDM ведущих производителей.

К первому классу относятся сервисы, использующие данные о местоположении пользователя (в частности, навигационные сервисы и сервисы, предоставляющие информацию о состоянии транспортной сети). Как показано на рис. 4, среди рас-



смотренных систем MDM только 40 % предоставляют функцию определения местоположения устройства, и еще меньшее количество систем поддерживает возможность управления устройством на основе его местоположения. Таким образом, реализация функции определения местоположения мобильных устройств может дать разрабатываемой системе MDM конкурентное преимущество перед системами, не имеющими этой функции.

Одной из возможных причин ограниченной поддержки функции определения местоположения системами MDM может быть трудность локализации устройств в помещениях. Для современных мобильных устройств, оснащенных приемниками GPS или ГЛОНАСС, задача определения координат устройства на открытой местности не представляет сложности. В то же время определение положения устройства в помещении оказывается существенно более трудной задачей, что обусловлено в первую очередь более высокими требованиями к точности локализации. В частности, серьезную проблему представляет определение того, в каком из соседних помещений находится устройство, особенно если задачу локализации нужно решать для многоэтажных зданий.

Исходя из этого, дополнительное конкурентное преимущество можно получить, если удастся повысить точность локализации мобильных устройств в помещениях.

Второй класс сервисов, который вызывает высокий интерес у пользователей, связан с управлением внешними устройствами с помощью мобильных устройств пользователей. Сценарии использования таких сервисов могут включать, к примеру, демонстрацию видеозаписей, фотографий или презентаций с помощью телевизоров или проекторов, создание лабораторных стендов с дистанционным управлением.

Ряд современных устройств (в частности, телевизоров) уже поддерживает дистанционное управление с мобильных устройств, но поддержка обычно ограничивается только одной мобильной платфор-

мой и фиксированным набором сервисов. Значительная часть устройств поддерживает подключение к компьютеру, но не взаимодействует с мобильными устройствами. Для того чтобы такими устройствами можно было дистанционно управлять с помощью мобильных устройств, необходимо решить ряд задач, в число которых входят аутентификация пользователей, разграничение прав доступа (возможно, с учетом местоположения устройства), предоставление пользователю перечня доступных устройств, установка и запуск на мобильных устройствах специализированных приложений для взаимодействия с оборудованием. Эти задачи могут быть решены с помощью системы MDM. В таком случае для поддержки нового класса устройств достаточно будет реализовать сервис взаимодействия с конкретным устройством, используя общий интерфейс управления устройствами MDM. В случае особых требований к интерфейсу управления требуется разработать мобильные приложения для основных мобильных платформ, однако и эта задача может быть упрощена путем реализации интерфейса управления как web-приложения.

Анализ возможностей существующих систем MDM показывает, что ни один из производителей не заявляет возможность управления внешними устройствами в качестве поддерживаемой функции. С учетом востребованности соответствующих сервисов среди пользователей, реализация такой функциональности в системе MDM позволит ей конкурировать с лидирующими на рынке системами управления мобильными устройствами.

В статье приведены данные о наборе базовых функций управления мобильными устройствами, которые реализуются лидирующими производителями решений MDM. В результате анализа выделено подмножество функций, которые должны быть реализованы в любой системе MDM, чтобы она была способна конкурировать с альтернативными решениями на мировом рынке систем управления мобильными

ми устройствами. Кроме того, определены две функции (локализация мобильных устройств и организация интерфейса дистанционного управления внешними устройствами), реализация которых в системе MDM может дать ей конкурентные преимущества, в т. ч. по сравнению с лидерами рынка.

Разработка программного обеспечения для систем централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках совместного проекта компании IBS (Москва) и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kennedy D.** Information security: Wave 16. 2013 451 Research, LLC [электронный ресурс] / URL: <http://www.451research> (дата обращения 2013).
2. Gartner, Inc. Top 10 Mobile Technologies for 2012 and 2013 [электронный ресурс] / URL: <http://my.gartner.com/portal/server.pt?open=512&objID=270&mode=2&PageID=3862698&resId=1923514> (дата обращения 2013).
3. Meidata. Mobile Device Management Global Market Analysis [электронный ресурс] / URL: <http://meidata.com/> (дата обращения 2014).
4. **Hoffman B.** Worldwide Mobile Enterprise Management Software 2012 – 2016 Forecast and Analysis and 2011 Vendor Share. IDC 2012.
5. **Adamson M.** MDM: A Top Trend to Follow for the Enterprise and Solution Providers Alike. MDM Solutions News [электронный ресурс] / URL: <http://solutions-review.com/mobile-device-management/mdm-a-top-trend-to-follow-for-the-enterprise-and-solution-providers-alike/> (дата обращения 2013).
6. **Donovan F.** Gartner: AirWatch, Citrix, MobileIron among MDM leaders [электронный ресурс] / URL: <http://www.fiercemobileit.com/story/gartner-airwatch-citrix-mobileiron-among-mdm-leaders/2013-06-05> (дата обращения 2013).
7. Обзор: Мобильные приложения для бизнеса 2013 [электронный ресурс] / URL: http://www.cnews.ru/reviews/new/mobilnye_prilozheniya_dlya_biznesa_2013/ (дата обращения 2013).
8. Mind Commerce. The Future of Mobile Device Management (MDM) [электронный ресурс] / URL: <http://blogs.skillsoft.com/learning-re-imagined/2014/03/the-future-of-mobile-device-management-mdm.html> (дата обращения 2013).
9. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities // International Journal of Information Technology & Computer Science. 2014. Vol. 13. No. 2. Pp. 35–41.
10. Gartner, Inc. Magic Quadrant for Mobile Device Management Software [электронный ресурс] / URL: <http://www.gartner.com/technology/reprints.do?id=1-1FRG59X&ct=130523&st=sb> (дата обращения 2013).
11. Solution Review. Mobile Device Management Buyers Guide. 2014.
12. **Gray B., Kane C.** Market Overview: On-Premises Mobile Device Management Solutions, Q3 2011. 2012.
13. **Basso M., Redman P.** Critical Capabilities for Mobile Device Management. Gartner, Inc. 2012.
14. **Majdi E.B.** Evaluation of Mobile Device Management tools and analyzing integration models for mobility enterprise. Umea University, 2013.
15. **Унучин Р., Чебышев В.** Мобильные угрозы – 2013. ЗАО «Лаборатория Касперского» [электронный ресурс] / URL: https://www.securelist.com/ru/analysis/208050833/Mobilnye_ugrozy_2013 (дата обращения 2013).

REFERENCES

1. **Kennedy D.** Information security: Wave 16. 2013 451 Research, LLC. Available: <http://www.451research>
2. Gartner, Inc. Top 10 Mobile Technologies for 2012 and 2013. Available: <http://my.gartner.com/portal/server.pt?open=512&objID=270&mode=2&PageID=3862698&resId=1923514>
3. Meidata. Mobile Device Management Global Market Analysis. Available: <http://meidata.com/>
4. **Hoffman B.** Worldwide Mobile Enterprise Management Software 2012 – 2016 Forecast and Analysis and 2011 Vendor Share. IDC 2012.
5. **Adamson M.** MDM: A Top Trend to Follow for the Enterprise and Solution Providers Alike. MDM



Solutions News. Available: <http://solutions-review.com/mobile-device-management/mdm-a-top-trend-to-follow-for-the-enterprise-and-solution-providers-alike/>

6. **Donovan F.** *Gartner: AirWatch, Citrix, MobileIron among MDM leaders*. Available: <http://www.fiercemobileit.com/story/gartner-airwatch-citrix-mobileiron-among-mdm-leaders/2013-06-05>

7. *Obzor: Mobilnyye prilozheniya dlya biznesa 2013*. Available: http://www.cnews.ru/reviews/new/mobilnye_prilozheniya_dlya_biznesa_2013/

8. *Mind Commerce. The Future of Mobile Device Management (MDM)*. Available: <http://blogs.skillssoft.com/learning-re-imagined/2014/03/the-future-of-mobile-device-management-mdm.html>

9. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities, *International Journal of Information Technology & Computer Science*, 2014,

Vol. 13. No. 2, Pp. 35–41.

10. **Gartner, Inc.** *Magic Quadrant for Mobile Device Management Software*. Available: <http://www.gartner.com/technology/reprints.do?id=1-1FRG59X&ct=130523&st=sb>

11. *Solution Review. Mobile Device Management Buyers Guide*. 2014.

12. **Gray B., Kane C.** *Market Overview: On-Premises Mobile Device Management Solutions, Q3 2011*. 2012.

13. **Basso M., Redman P.** *Critical Capabilities for Mobile Device Management*. Gartner, Inc. 2012.

14. **Majdi E.B.** *Evaluation of Mobile Device Management tools and analyzing integration models for mobility enterprise*. Umea University, 2013.

15. **Unuchin R., Chebyshev V.** *Mobilnyye ugrozy – 2013*. ZAO «Laboratoriya Kasperskogo». Available: https://www.securelist.com/ru/analysis/208050833/Mobilnye_ugrozy_2013

САМОЧАДИН Александр Викторович — профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN, Alexander V. *St. Petersburg State Polytechnical University*.

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: samochadin@gmail.com

САМОЧАДИНА Татьяна Николаевна — старший преподаватель кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: samochadina@dcn.icc.spbstu.ru

SAMOCHADINA, Tatiana N. *St. Petersburg State Polytechnical University*.

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: samochadina@dcn.icc.spbstu.ru

ТИМОФЕЕВ Дмитрий Андреевич — старший преподаватель кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

TIMOFEEV, Dmitry A. *St. Petersburg State Polytechnical University*.

195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

ПОПОВ Сергей Олегович — *IBS, руководитель проектов.*
127434, Россия, Москва, Дмитровское ш., д. 9Б.
E-mail: spopov@ibs.ru

POPOV, Sergey O. *IBS Group Holding Ltd.*
127434, Dmitrovskoye Sh. 9B, Moscow, Russia.
E-mail: spopov@ibs.ru



Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 004.77

В.В. Глазунов, М.А. Курочкин

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ СТЕНД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОКОЛОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ СЕТЕВОГО УРОВНЯ В МОБИЛЬНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ

V.V. Glazunov, M.A. Kurochkin

HARDWARE-SOFTWARE MODELLING STAND OF DYNAMIC ROUTING PROTOCOLS NETWORK LAYER IN A MOBILE HETEROGENEOUS NETWORK

Изучены характеристики протоколов динамической маршрутизации при моделировании движения мобильного объекта в городской среде. Среда моделирования позволяет изменять объем передаваемых данных, скорость передачи, характер и интенсивность отказов. Исследования проведены для протоколов OLSR и B.A.T.M.A.N. Полученные результаты позволили сформулировать оптимальные условия использования этих протоколов на борту автомобиля.

OLSR; B.A.T.M.A.N.; MESH-СЕТИ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПРОТОКОЛЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ; СТЕНД.

This paper investigates the characteristics of dynamic routing protocols in the simulation of vehicles in the urban environment. Simulation environment allows you to change the amount of transmitted data, the transmission rate, the parameters and intensity of failures. Research conducted for the protocols OLSR and B.A.T.M.A.N. The obtained results allowed us to formulate optimum conditions of use of these protocols on board the vehicle.

OLSR; B.A.T.M.A.N.; MESH-NETWORK; INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS; SIMULATION; DYNAMIC ROUTING PROTOCOLS; STAND.

Использование беспроводных технологий передачи данных в мобильных транспортных сетях создает основу для развития интеллектуальных транспортных систем. Расширение спектра информационных услуг, предоставляемых сервисным центром, службам управления движением, водителям и пассажирам, позволяет повысить безопасность участников движения, увеличить пропускную способность автомагистралей, повысить комфорт пассажирам.

В настоящее время ведущими автомобильными компаниями проводятся работы

по установке на борту автомобиля телематических устройств, позволяющих поддерживать непрерывную двухнаправленную цифровую связь с другими участниками движения и дорожными службами. Ограничением таких устройств является использование одного канала передачи данных, поэтому при повышении объема передаваемых данных скорость передачи резко падает или соединение абонентов разрывается [1]. Решением этой проблемы является расширение количества поддерживаемых бортовым телематическим устройством технологий

передачи данных, что обеспечивает высокую надежность обмена данными между абонентами. В этом случае любой автомобиль может выступать ретранслятором данных, становясь мультипротокольным узлом. В мультипротокольном узле интегрируются локальные и глобальные технологии передачи данных, такие как LTE, UMTS, Wi-Fi, DSRC, Bluetooth, ZigBee. Совокупность подобных технологий составляет мобильную гетерогенную сеть транспортных средств.

Главная проблема маршрутизации данных в мобильных гетерогенных сетях транспортных средств — высокая динамика топологии сети, что требует постоянной актуализации путей передачи данных между мобильными абонентами и инфраструктурой. Для решения этой задачи используются протоколы динамической маршрутизации сетевого уровня, разработанные специально для мобильных сетей, к которым относятся B.A.T.M.A.N., OLSR, AODV, DSDV.

В условиях высокой динамики и одно-временного применения нескольких технологий передачи данных становится актуальным исследование времени конвергенции сети, т. е. реакции протокола на изменение топологии сети.

Особо остро проблема конвергенции сети встанет при массовом использовании мультипротокольных узлов в перспективных интеллектуальных транспортных системах, что обуславливает необходимость выработки рекомендаций о применении протоколов динамической маршрутизации сетевого уровня.

Исследование характеристик протоколов позволит обосновать выбор протоколов маршрутизации в мобильных динамичных интеллектуальных транспортных системах.

Состояние проблемы

Основными работами, связанными с исследованием протоколов динамической маршрутизации, являются [2, 3]. Авторы данных работ рассматривают низкоуровневые характеристики протоколов в Ad-Hoc сетях, такие как объем служебного трафика при передаче данных и время задержки при передаче служебных пакетов.

В [2] проведено сравнение протоколов

OLSR и B.A.T.M.A.N. по критериям среднего времени передачи файлов и отправки множества ICMP запросов, использованы экспериментальные Wi-Fi сети.

В [3] проверено качество доставки сообщений, время восстановления (конвергенции) сети и нагрузка на сеть в процессе работы протоколов OLSR, B.A.T.M.A.N. и DSR в мобильной сети внутри здания.

В современных интеллектуальных транспортных системах между мобильными абонентами реализуются около десяти сценариев обмена данными [4]. В табл. 1 приведены предельные объемы данных для наиболее распространенных сценариев.

Интервал предельных значений объемов файлов составляет 10 KB–100 MB. Так, например, размер данных:

информационных сообщений, таких как e-Call, геоинформация и сервисные сообщения не превышает 10 KB;

текстовых документов, почтовых сообщений и гипертекстовых файлов находится в диапазоне от 10 до 100 KB;

файлов графических данных медиаконтента или обновления системного ПО составляет от 1 до 10 MB;

файлов с аудио и видео, обновлений программ и данных пользователя, лежит в диапазоне 10–100 MB;

Таким образом, к типичным объемам данных следует отнести следующие объемы: 10 KB, 100 KB, 1 MB, 10 MB, 100 MB.

Фактическая скорость передачи данных по каналам связи существенно отличается от максимально заявленной для конкретной технологии. На практике она ограничивается поставщиками услуг, аппаратными настройками сетевого оборудования и программными установками серверной инфраструктуры.

Кроме этого скорость передачи в конкретный момент времени зависит от загрузки канала, которая носит случайный характер и в свою очередь зависит от активности пользователей. Поэтому представляет интерес исследование временных характеристик протоколов маршрутизации для типовых объемов данных и реальных скоростей передачи.

Таблица 1

Сценарии обмена данными

Сценарии обмена данными	Предельный объем, КБ	Частота обновления
Сообщение о погодных условиях, о состоянии дорожного покрытия, об оперативных изменениях в транспортной сети	10–100	Событийно
Сбор и отображение данных о местоположении автомобилей других участников движения	10–10 ³	Постоянно
Автоматическое сохранение треков движения транспортного средства с видеофиксацией ключевых точек движения по времени или по событию	10–10 ³	Постоянно
Передача сообщений об аварийных ситуациях	10–100	Событийно
Дистанционная загрузка новых версий программного обеспечения (ПО)	10 ³ –10 ⁵	Эпизодически
Аудио- и видеоконсультации водителя о техническом состоянии автомобиля	10 ³ –10 ⁵	Эпизодически
Телекоммуникационная среда для пассажиров автомобилей (медиа контент)	10 ⁴ –10 ⁵	Постоянно
Сообщения о необходимости прохождения технических осмотров или срочного ремонта	100–10 ³	Событийно
Дистанционное управление агрегатами автомобиля	10–10 ³	Событийно

Условия экспериментов

Вариативность загрузки канала LTE оставляет абонента в условиях неопределенности текущей скорости доступа к файлам и сервисам. Поэтому для сокращения времени информационного обмена необходимо иметь альтернативные пути доставки файлов и доступа к сервисам через цепочки ретрансляторов.

Для данного исследования выбраны следующие технологии доступа по каналам связи:

- LTE обеспечивает соединение с облачной средой и сервисами доступа к файлам;
- Mesh обеспечивает альтернативный вариант взаимодействия между мобильными абонентами и соединение с облачной средой посредством ретрансляторов [5].

Объектами исследования являются протоколы динамической маршрутизации [6] OLSR и B.A.T.M.A.N. ввиду их непосредственной ориентации на использование в

динамических мобильных сетях. Эти протоколы разработаны для мобильных сетей и позволяют находить маршруты передачи данных после реконфигурации сети. В экспериментах рассмотрены реализации двух классов протоколов: B.A.T.M.A.N. [7] – из класса протоколов на основе расчета векторов расстояний и OLSR [8] – на основе анализа состояния канала. Различия состоят в том, что протокол OLSR строит полный путь до адресата, а протокол B.A.T.M.A.N. – рассчитывает вектор расстояний и на его основе выбирает следующий переход. Такой подход позволяет исследовать различие времени передачи файлов разного размера на разных скоростях в условиях наличия или отсутствия помех.

В экспериментах исследованы две технологии обмена сообщениями: LTE и Mesh, т. к. наиболее распространенные среди мобильных абонентов.

Передача данных между сервером и абонентами осуществляется с помощью протоколов прикладного уровня: ftp и http [9].

Это классические протоколы, доступные во многих web-приложениях, используются для получения гипертекстовых данных, медианных, графических данных.

Локальные технологии при подключении мобильных абонентов регламентируют устойчивый и неустойчивый режим соединений.

Устойчивое соединение задается следующими параметрами: автомобиль неподвижен; установлено подключение автомобиля к мобильной локальной сети, например, посредством Wi-Fi.

Неустойчивое соединение: автомобиль движется от одной точки доступа к другой. В этом случае возникают интервалы отсутствия связи.

Наибольший интерес для специалистов представляет исследование особенностей неустойчивого режима соединений посредством Wi-Fi. Для этой цели разработан программно-аппаратный стенд моделирования протоколов динамической маршрутизации сетевого уровня.

Архитектура программно-аппаратного стенда

Стенд состоит из имитатора облачных сервисов и мультипротокольных подвижных узлов (МПУ). Имитатор сервисов и МПУ соединены беспроводными сетями технологий LTE, Mesh, DSRC, Wi-Fi и Bluetooth, что позволяет объединять в МПУ и имитатор в гетерогенные мобильные сети.

Стенд обеспечивает исследование свойств информационного взаимодействия транспортных средств с облачными сервисами, дорожной инфраструктурой и между собой в нескольких беспроводных сетях. Аппаратное и программное обеспечение стенда позволяет проводить натурные эксперименты с целью исследования характеристик мобильных одноранговых сетей передачи данных, использования транспортными средствами облачных сервисов и обмена данными с объектами дорожной инфраструктуры. Стенд обеспечивает расширяемость программной компоненты относительно числа применяемых протоколов передачи данных, технологий беспроводной передачи данных и масштабируемость относительно числа облачных сервисов и

мультипротокольных узлов.

Фрагмент структуры аппаратной части стенда, необходимой для постановки эксперимента, приведен на рис. 1.

Стенд состоит из двух блоков МПУ, имитатора нагрузки каналов, точки доступа Wi-Fi. Имитатор нагрузки предоставляет доступ к файлам абонентам мобильной сети. Каждый блок МПУ обеспечивает работу с двумя интерфейсами (Mesh и Wi-Fi или Mesh и LTE), что позволяет организовать обмен данными в различных направлениях и осуществлять передачу данных по различным технологиям. МПУ-1 реализует клиента, который подключается к имитатору нагрузки. МПУ-2 — ретранслятор, связывающий МПУ-1 и имитатор нагрузки.

Программное обеспечение стенда реализует децентрализованное управление синхронизацией времени, моментами запуска и останова клиентов и серверов служб, генерацию пользовательского трафика, выполнение процедур настройки протоколов динамической маршрутизации.

Настройка программной части стенда обеспечивает выполнение сценариев движения мобильных абонентов, управление потоками передачи данных, моделирование помех, выбор протоколов маршрутизации и настройку характеристик беспроводных сетей связи, заявленных в проекте.

Оборудование тестового стенда работает под управлением операционной системы Debian GNU/Linux версии 7.4/Kernel 3.2.0-4. Для тестирования в различных режимах применяется как специализированное ПО (mgen — приложение, позволяющее генерировать сетевой трафик с заданными параметрами, и netflow — приложение для анализа и визуализации результатов тестирования), так и повсеместно используемые веб- и ftp-серверы: Lighttpd 1.4.31 и Vsftpd 2.3.5. Управление характеристиками канала выполняет программный пакет iptables 1.4.14. Клиентская сторона поддерживается FTP/HTTP Client: wget 1.13.4. Параметры конфигурации указанных приложений задаются в заранее подготовленных файлах тестовых сценариев, они позволяют моделировать различные повседневные модели взаимодействия подвижных объектов

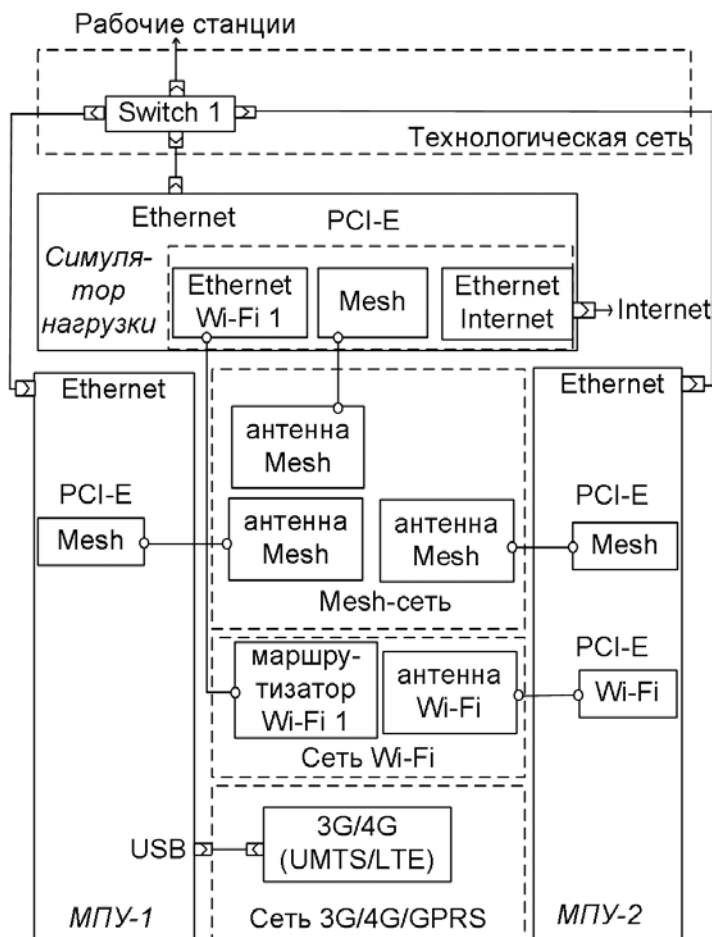


Рис. 1. Фрагмент структуры аппаратной части стенда

между собой и с облачной средой. В рамках тестовых сценариев изменяются правила доступности сетевых интерфейсов в зависимости от момента времени, величины потерь в различных каналах, пропускные способности в нисходящем/восходящем направлениях, тип рассылки (много- или одноадресная), транспортный протокол (TCP или UDP), размер сетевого пакета, прикладной протокол (HTTP, FTP). Программное обеспечение расположено на сетевых дисках, доступ к нему узлами осуществляется через NFS. Настройки ПО находятся в конфигурационных файлах, файлы загружаются на основе переменной $\{HOSTNAME\}$, содержащей имя узла, на котором был запущен данный модуль. Все участники эксперимента используют однотипное ПО. Настройки характеристик узла меняются за счет изменения значений пара-

метров модели и ветвей выполнения (определяется именем узла).

Для реализации сценариев движения мобильных абонентов, управления потоками передачи данных, моделирования помех, выбора протоколов маршрутизации, настройки характеристик каналов связи реализована архитектура ПО приведенная на рис. 2.

Модуль настройки сетевых интерфейсов назначает IP адреса, устанавливает VPN соединения, поднимает внутренние и внешние интерфейсы узлов.

Модуль настройки маршрутизации настраивает параметры протоколов динамической маршрутизации, добавляет плавающие статические маршруты, запускает службы (демоны) протоколов динамической маршрутизации. Настройки протоколов динамической маршрутизации находятся



Рис. 2. Архитектура программного обеспечения стенда

в разнесенных конфигурационных файлах, файлы загружаются на основе переменной $\{HOSTNAME\}$, содержащей имя узла, на котором был запущен данный модуль.

Модуль генерации сетевого трафика запускает файловые службы (демоны), такие как FTP, HTTP. На имитаторе нагрузки запускаются серверные части этих служб. На клиентах (MPU) запускается FTP, HTTP клиент для загрузки файлов выбранного размера; файлы должны быть предварительно сгенерированы на серверной части. Дополнительно осуществляется поддержка генерации трафика транспортного уровня через mgen: TCP, UDP. В случае использования UDP трафика обеспечивается возможность выбора многоадресного или широковещательного типов трафика.

Модуль фаервола создает помехи на канальном уровне, что предотвращает распространение маршрутов и данных в выбранном канале связи. Данный модуль используется модулем генератора помех для создания мобильной схемы движения узла.

Модуль позволяет задать статистические, либо вероятностные модели помех в трафике, т. е. отбрасывание каждого n -го пакета, или вероятность прохождения пакета через фильтр. Механизм реализован через модуль statistics пакетного фильтра iptables. Позволяет дополнительно задавать правила защиты узлов, когда эксперимент идет с использованием общедоступных проводных или беспроводных каналов связи.

Модуль завершения эксперимента и сбора статистики записывает время скачивания файла, учитывая время восстановления после разрыва связи. Весь проходящий через узлы трафик учитывается при помощи модуля netflow, состоящего из нескольких компонентов: ядерной части (ipt-netflow), и пользовательского демона (коллектора), производящего сбор и агрегацию данных по потокам. Кроме этого, модуль включает средства агрегации данных для вычисления численных характеристик для построения графических зависимостей. После завершения эксперимента модуль выполняет

удаленное завершение на других узлах сети (на тех, где службы не могут остановиться, т. к. момент останова неизвестен). Чтобы предотвратить влияние выполнения служебных команд на численные показатели измерений, используется служебный канал передачи данных. После чего выполняется фиксация всех измерений netflow и минутное ожидание, чтобы завершился максимальный цикл сбора данных через netflow.

Разработанная методика проведения эксперимента предусматривает следующие этапы:

1. Настройка интерфейсов (IP-адреса, VPN-соединения, Mesh-сеть).
2. Настройка файервола.
3. Установка протокола динамической маршрутизации.
4. Задание модели работоспособности Mesh-канала.
5. Установка протокола прикладного уровня.
6. Задание размера файла, содержащего сообщение.
7. Задание скорости отдачи сервера.
8. Задание числа итераций проведения эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились с целью определения времени передачи файлов при использовании протоколов маршрутизации OLSR и B.A.T.M.A.N. [10] в условии помех, соответствующих движению автомобиля в городе. Смоделируем ситуацию, когда один автомобиль, имея выделенный канал LTE, периодически подключается к Mesh-сети, у которой есть высокоскоростной шлюз в сети Интернет. Автомобиль загружает на борт файлы обновления системного и пользовательского ПО. Для моделирования процесса загрузки файлов от сервера к клиенту были выбра-

ны протоколы FTP и HTTP, как наиболее распространенные для этого приложения. В экспериментах использовались два альтернативных канала для получения пакетов — LTE и Mesh. Приоритетным направлением для скачки файла выбран канал через Mesh-сеть, как более быстрый. Изменяемые параметры экспериментов приведены в табл. 2.

Интервалы отправки пакетов приветствия для протоколов OLSR и B.A.T.M.A.N. установлены в секунду.

В ходе эксперимента измеряется конечное время передачи файлов для протоколов FTP и HTTP. Модель генерации помех в Mesh-сети приведена для случая движения автомобиля по городской трассе и соответствует движению автомобиля между перекрестками со скоростью 60 км/ч. Модель представлена чередованием интервалов времени устойчивой и неустойчивой связи. Один цикл равен 60 с, что соответствует участку пути в километр.

Первый интервал кратковременного отключения канала связи на 1 с иллюстрирует ситуацию подключения к новой точки доступа. Следующие 7 с автомобиль движется в диапазоне действия новой точки доступа. Далее сигнал от всех соседей пропадает, такая ситуация может иллюстрировать попадание в тоннель или заезд на территорию с отсутствующим покрытием технологией 802.11s. После чего появляется зона уверенного приема с несколькими вариантами доступа к сети, которая длится 250 м (15 с). После чего происходит кратковременная потеря связи на более короткий промежуток времени (3 с). В конце выполнения цикл симуляции повторяется.

Предлагаемая модель работоспособности соответствует режиму работы протоколов динамической маршрутизации и

Таблица 2

Входные экспериментальные данные

Параметр	Значение
Протокол маршрутизации	OLSR, B.A.T.M.A.N.
Размеры файлов	10 KB, 100 KB, 1 MB, 10 MB, 100 MB
Скорость отдачи сервера	128 Кбит/с, 1024 Кбит/с, 11 Мбит/с (Unlimited)
Протоколы загрузки файла	FTP, HTTP

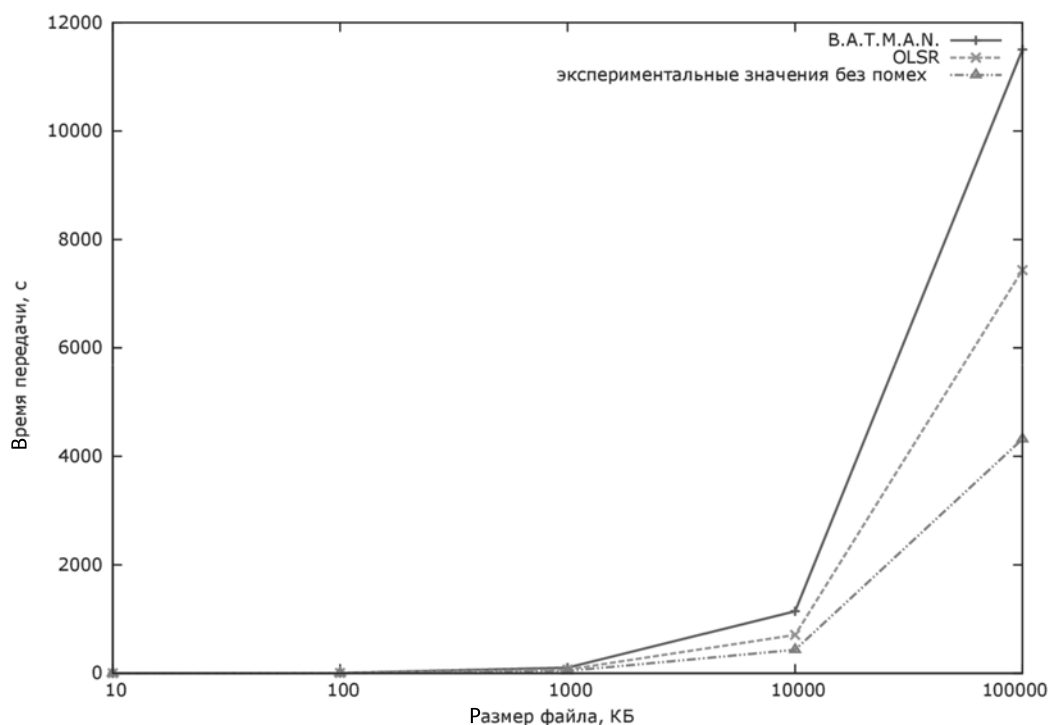


Рис. 3. Зависимость времени передачи файла от размера, для протоколов B.A.T.M.A.N. и OLSR для скорости отдачи файла 128 Кбит/с (первая серия)

передачи данных в условиях повышенной нестабильности сетевой топологии.

В процессе работы проведено три серии экспериментов для каждой скорости. В каждой серии проведено по 400 измерений. На рис. 3–5 приведены графические представления результатов этих экспериментов. Идеальный вариант в условиях отсутствия помех, где не производится перестройка маршрутов, представлен на графиках как «экспериментальные значения без помех» и является показателем того, насколько работа протоколов маршрутизации отличается от идеального случая.

Результаты первой серии показывают динамику передачи данных на медленных скоростях (128 Кбит/с). Такая скорость характерна для передачи больших объемов данных, включающих в себя информацию о дорожной сети и других абонентах. На графике изображены зависимости времени передачи данных по протоколу http от размера файла при использовании протокола динамической маршрутизации B.A.T.M.A.N. и OLSR, а также идеальный вариант передачи по Mesh-сети без помех, создаваемых

схемой движения. По результатам эксперимента протокол динамической маршрутизации OLSR продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с протоколом B.A.T.M.A.N. При передаче больших типов данных (более 10 MB) выигрыш в скорости передачи составляет до 35 %. Это связано с тем, что количество помех, возникающих во время скачки самого файла, возрастает пропорционально размеру файла и скорости передачи. Следовательно, в таком случае необходимо как можно быстрее переключиться на альтернативный канал передачи, не ожидая восстановления основного канала связи, т. к. время простоя будет существенно отражаться на объеме передаваемых данных. Протокол B.A.T.M.A.N. наоборот ожидает восстановления работоспособности канала по основному каналу связи, не удаляя путь из таблицы маршрутизации. Дополнительно установлено, что на низких скоростях передачи данных (128 Кбит/с) по результатам эксперимента для больших файлов (более 10 MB) рекомендуемым протоколом уровня приложений является протокол http, демонстрирующий время пере-

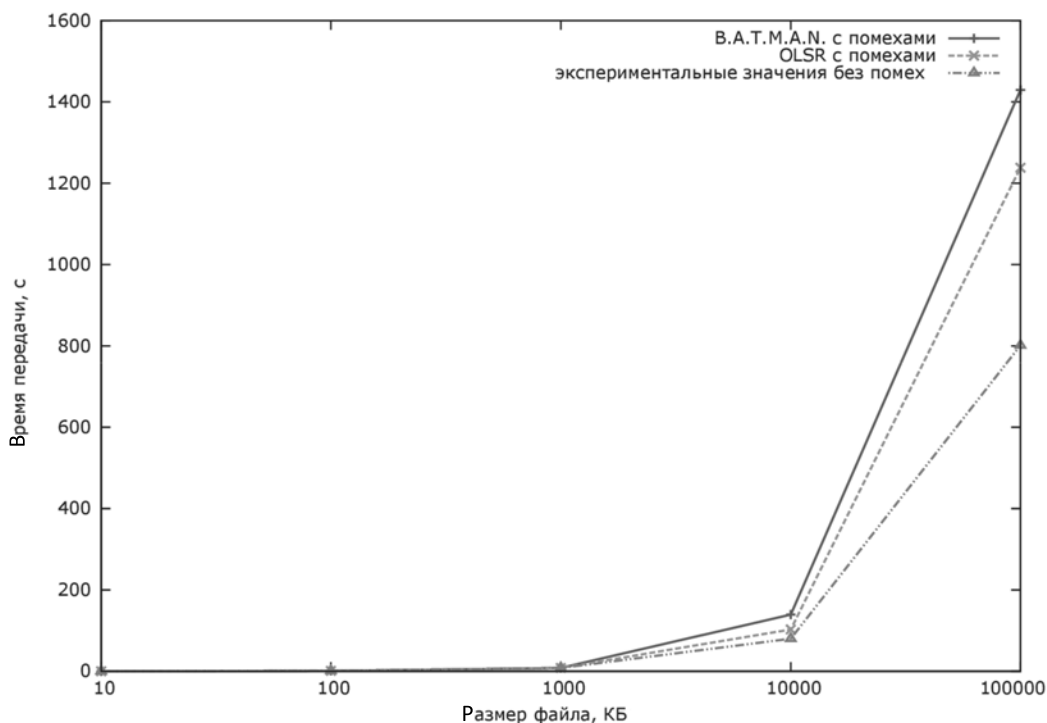


Рис. 4. Зависимость времени передачи файла от размера, для протоколов B.A.T.M.A.N. и OLSR для скорости отдачи файла 1024 Кбит/с (вторая серия)

дачи ниже на 10–30 %. Это связано с тем, что в протоколе http используется меньшее количество команд управления, которые должны быть выполнены до начала загрузки файла, а при пропадании связи (возникновении помех) и докачке файла протокол обязан выполнять эти команды управления повторно. Для скорости отдачи файла 1024 Кбит/с.

Результаты второй серии показывают динамику передачи данных на средних скоростях (1024 Кбит/с). Такая скорость характерна для передачи больших объемов данных, включающих в себя веб-трафик, онлайн-конференции. На графике изображены зависимости времени передачи данных по протоколу http от размера файла при использовании протокола динамической маршрутизации B.A.T.M.A.N. и OLSR, а также идеальный вариант передачи по Mesh-сети без помех, создаваемых схемой движения. По результатам эксперимента протокол динамической маршрутизации OLSR продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с протоколом B.A.T.M.A.N., при передаче больших типов

данных (более 10 МВ) выигрыш в скорости передачи составляет до 20 %. Это связано с тем, что количество помех, возникающих во время скачки самого файла, возрастает пропорционально размеру файла и скорости передачи.

Результаты третьей серии показывают динамику передачи данных на максимально возможных скоростях для Mesh-сети (около 11 Мбит/с). Такая скорость характерна для передачи больших объемов данных, включающих в себя мультимедийные данные и обновления. На графике изображены зависимости времени передачи данных по протоколу http от размера файла при использовании протокола динамической маршрутизации B.A.T.M.A.N. и OLSR, а также идеальный вариант передачи по Mesh-сети без помех, создаваемых схемой движения. По результатам эксперимента протокол динамической маршрутизации B.A.T.M.A.N. продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с протоколом OLSR, при передаче больших типов данных (более 10 МВ), выигрыш в скорости передачи составляет до 50 %. Это связано

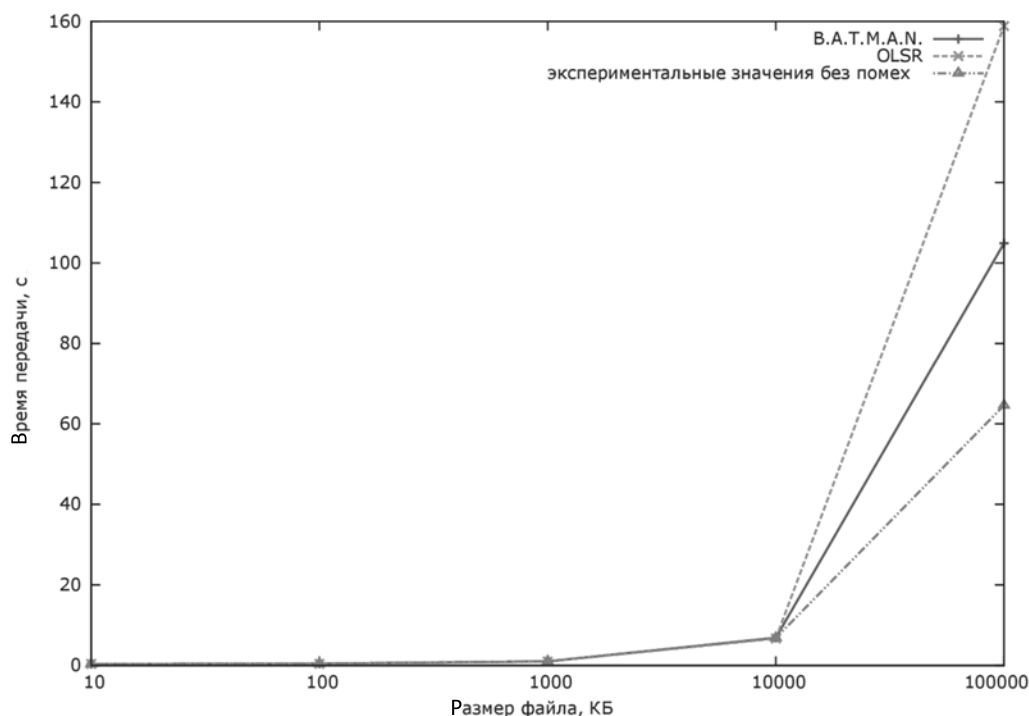


Рис. 5. Зависимость времени передачи файла от размера, для протоколов B.A.T.M.A.N. и OLSR для скорости отдачи файла 11 Мбит/с (третья серия)

с тем, что сам протокол ориентирован на восстанавливающиеся связи (частые прерывания, но восстановление идет по тому же пути), следовательно существующий путь даже после пропадания соседа не удаляется из таблицы маршрутизации, а остается активным. Таким образом, за время возникновения помех маршрут передачи данных не перестраивается, что не требует дополнительных временных затрат на перерасчет маршрута при повторном появлении связи, как происходит в случае использования протокола OLSR.

Результаты трех серий экспериментов показали, что при отправке небольших пакетов данных, в независимости от выбранного протокола динамической маршрутизации, доставка происходит за короткие промежутки времени даже при низких скоростях каналов связи либо ограничениях сервера отправки данных. Это позволяет организовать оповещение об экстренных событиях eCall либо сбор статистических данных с автомобиля уже с использованием текущей инфраструктуры сети.

Разработаны архитектура программно-аппаратного стенда исследования временных характеристик протоколов маршрутизации и методика проведения экспериментов, определены параметры проведенных экспериментов. Проведенные на стенде эксперименты позволили оценить применимость различных протоколов динамической маршрутизации в условиях движения мобильного объекта в городской среде для разных объемов данных.

Наилучшим протоколом динамической маршрутизации на низких скоростях (128 Кбит/с) при передаче файлов более 10 МВ является протокол OLSR, разница во времени скачивания файла составляет до 35 %. На низких скоростях передачи данных (128 Кбит/с) рекомендуемым протоколом уровня приложений является протокол http, демонстрирующий время передачи ниже на 10–30 %.

Для средних скоростей (1 Мбит/с) и файлов более 10 МВ наилучшим также является протокол OLSR, выигрыш по време-



ни скачивания файла составляет до 20 %. На высоких скоростях (11 Мбит/с) передачи данных предпочтительнее использовать протокол динамической маршрутизации В.А.Т.М.А.Н., при его использовании выигрыш по времени скачивания файла составляет до 50 %.

По результатам экспериментов мож-

но сделать вывод, что В.А.Т.М.А.Н. менее предпочтителен для часто меняющейся топологии. Протокол больше ориентирован на восстанавливающиеся связи (частые прерывания, но восстановление идет по тому же пути), поэтому его предпочтительнее использовать на высоких скоростях передачи данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазунов В.В., Курочкин М.А., Попов С.Г. Проблемы построения интеллектуальной транспортной сети //Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: Матер. междунар. науч.-метод. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. Т. 1. С. 32–34.
2. Murray D., Dixon M., Koziniec T. An experimental comparison of routing protocols in multi-hop ad hoc networks // Telecommunication Networks and Applications Conf. 2010. Pp. 159–164.
3. Abolhasan M., Hagelstein B., Wang. Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols // Communications, 15th Asia-Pacific Conf. 2009. Pp. 44–47.
4. Glazunov V., Kurochkin L., Kurochkin M., Popov S. Instrumental environment of multi-protocol cloud-oriented vehicular mesh network // ICINCO. 2013. Vol. 1. Pp. 568–574.
5. Chakraborty S., Nandi S. IEEE 802.11s Mesh Backbone for Vehicular Communication: Fairness and Throughput // Vehicular Technology, IEEE Transactions. 2013. Vol 62. No. 5. Pp. 2193–2203.
6. Вишнеvский В., Лаконцев Д., Сафонов А., Шпилев С. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11S: протоколы маршрутизации // ПЕРВАЯ МИЛЯ. М.: Рекламно-издат. центр «Техносфера», 2009. № 1. Т. 10. С. 16–21.
7. Davinder S.S., Sukesh S. Performance Evaluation of BATMAN, DSR, OLSR Routing Protocols - A Review // International J. of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 2250–2459.
8. Laouiti A., Muhlethaler P, Sayah F., Toor Y. Quantitative Evaluation of the Cost of Routing Protocol OLSR in a Vehicle Ad Hoc NETWORK (VANET) // Vehicular Technology Conf. 2008. Pp. 2986–2990.
9. Zaborovskiy V., Lukashin A., Popov S., Vostrov A. Adage mobile services for its infrastructure // ITS Telecommunications. 13th Internat. Conf. 2013. Pp. 127–132.
10. Kulla E., Hiyama M., Ikeda M., Barolli L. Performance comparison of olsr and batman routing protocols by a manet testbed in stairs environment // Comput. Math. Appl. 2012. Vol. 63. No. 2. Pp. 339–349.

REFERENCES

1. Glazunov V.V., Kurochkin M.A., Popov S.G. Problemy postroyeniya intellektualnoy transportnoy seti, *Vysokiye intellektualnyye tekhnologii i innovatsii v natsionalnykh issledovatel'skikh universitetakh, Materialy mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2013, Vol. 1, Pp. 32–34. (rus)
2. Murray D., Dixon M., Koziniec T. An experimental comparison of routing protocols in multi-hop ad hoc networks, *Telecommunication Networks and Applications Conference*, 2010, Pp. 159–164.
3. Abolhasan M., Hagelstein B., Wang. Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols, *Communications, 15th Asia-Pacific Conference on*, 2009, Pp. 44–47.
4. Glazunov V., Kurochkin L., Kurochkin M., Popov S. Instrumental environment of multi-protocol cloud-oriented vehicular mesh network. *ICINCO*, 2013, Vol. 1, Pp. 568–574.
5. Chakraborty S., Nandi S. IEEE 802.11s Mesh Backbone for Vehicular Communication: Fairness and Throughput, *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2013, Vol. 62, No. 5, Pp. 2193–2203.
6. Vishnevskiy V., Lakontsev D., Safonov A., Shpilev S. Mesh-сети стандарта IEEE 802.11S: протоколы маршрутизации, *Pervaya Milya*. Moscow: Reklamno-izdatelskiy tsentr «Tekhnosfera» Publ., 2009, No. 1, Vol. 10, Pp. 16–21. (rus)
7. Davinder S.S., Sukesh S. Performance Evaluation of BATMAN, DSR, OLSR Routing Protocols – A Review, *International Journal of*

Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012, Vol. 2, No. 1, Pp. 2250–2459.

8. **Laouiti A., Muhlethaler P, Sayah F., Toor Y.** Quantitative Evaluation of the Cost of Routing Protocol OLSR in a Vehicle Ad Hoc NETwork (VANET). *Vehicular Technology Conference*, 2008, Pp. 2986–2990.

9. **Zaborovskiy V., Lukashin A., Popov S., Vostrov A.**

Adage mobile services for its infrastructure. *ITS Telecommunications, 13th International Conference on*, 2013, Pp. 127–132.

10. **Kulla E., Hiyama M., Ikeda M., Barolli L.** Performance comparison of olsr and batman routing protocols by a manet testbed in stairs environment. *Comput. Math. Appl.*, 2012, Vol. 63, No. 2, Pp. 339–349.

ГЛАЗУНОВ Вадим Валерьевич — аспирант кафедры телематики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: neweagle@gmail.com

GLAZUNOV, Vadim V. *St. Petersburg State Polytechnical University*. 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: neweagle@gmail.com

КУРОЧКИН Михаил Александрович — профессор кафедры телематики Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: kurochkin.m@gmail.com

KUROCHKIN, Mikhail A. *St. Petersburg State Polytechnical University*. 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: kurochkin.m@gmail.com



УДК 004.054

В.П. Котляров, А.С. Иванов

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ SMS ОПОВЕЩЕНИЯ

V.P. Kotlyarov, A.S. Ivanov

PRINCIPLES OF SMS INFORMING SYSTEM TESTING

Описана методика тестирования системы отправки SMS оповещений в роуминге, высылаемых в соответствии с требованиями Федерального агентства связи. Данная методика является адаптацией известных подходов к обеспечению качества программных продуктов для применения в высоконагруженных телекоммуникационных системах. Систематизированы результаты исследований, полученные в ходе разработки и запуска системы, обслуживающей 15 миллионов абонентов. Предложенная методика может применяться без существенных изменений для обеспечения качества систем информирования.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ; ТЕСТИРОВАНИЕ ПО МОДЕЛИ; ТЕСТИРОВАНИЕ В ВИРТУАЛЬНОМ ОКРУЖЕНИИ; АНАЛИЗ РАБОТЫ JVM; SMS ИНФОРМИРОВАНИЕ.

Paper describes principles of testing high load system of SMS informing in GSM roaming. Suggested technique is an adaptation of known approaches to quality assurance of software products for use in high-telecommunication systems. This paper summarizes the experience gained during the development and launch of the system serving 15 million subscribers. The principles can be applied to any other sms information system.

TEST AUTOMATION; MODEL-BASED TESTING; VIRTUAL MACHINE ENVIRONMENT; JVM PERFORMANCE; SMS INFORMING

В 2011 г. Федеральное агентство связи выпустило предписание всем операторам сети подвижной сотовой связи о необходимости информирования абонентов, выезжающих за пределы обслуживания домашней сети оператора. Существующая система информирования, использовавшаяся федеральными операторами связи, не позволяла информировать абонентов о стоимости услуг в роуминге, состоянии их лицевого счета и возможностях снижения затрат в роуминге. В связи с этим была поставлена задача разработать методику обеспечения качества создаваемого программного продукта, учитывающую объем обрабатываемых данных, возросшую сложность системы, взаимодействие системы с критически важными объектами инфраструктуры оператора (Home Location Register, SMS центр).

В рассматриваемой области были известны следующие подходы к обеспечению качества:

1. Функциональное тестирование [1]. Данный вид тестирования проверяет, что система выполняет функции, описанные в техническом задании (ТЗ) на систему. Стандартные подходы предусматривают построение плана тестирования и дальнейшее применение системы автоматизации тестирования или тестирование по модели. В крупных проектах оба подхода требуют значительных ресурсов. Более полным видится подход с использованием модели системы, позволяющий оперативно вносить в модель изменения под требования заказчика, а в некоторых методологиях — проводить верификацию модели. Использование тестирования по модели системы требует специального обучения персонала, что препятствует использованию данного подхода в компаниях, в которых обходятся без отдела контроля качества.

2. Тестирование производительности [1]. Данный вид тестирования используется для

проверки системы на соответствие требованиям к качеству сервиса. Это особенно важно в высоконагруженных распределенных системах, т. е. распределенных системах с ограничениями на время отклика и положительной динамикой нагрузки. Для нагрузочных тестов часто используются генераторы запросов на систему, у которых в процессе генерации необходимо учитывать, что характер нагрузки в реальных системах меняется в зависимости от времени суток и дня недели. Кроме того, часто генераторы нагрузки не учитывают зависимости между входными данными, что может изменить характер нагрузки.

3. Тестирование восстановления [1]. Данный тип тестирования проверяет, что система может сама восстанавливаться после аварий: проблем на сети, отключения внешних систем, повреждения конфигурационных и справочных данных.

4. Тестирование безопасности [1]. Проверяет соответствие системы стандартам и требованиям к безопасности. Обычно применяется, когда система имеет интерфейсы, взаимодействующие с публичными сетями. Этот вид тестирования в данной статье не рассматривается.

5. Тестирование совместимости [1]. Основная цель данного вида тестирования — проверка работы системы с конкретным видом оборудования. Часто проводится поставщиком оборудования и в настоящей работе не рассматривается.

6. Тестирование интерфейса и локализации [1]. Данный вид тестирования используется для тестирования создаваемых интерфейсов оператора и администратора системы, он здесь также не рассматривается.

Исследование решения поставленной задачи предполагало выполнение следующих шагов:

1) определить и обосновать методы обеспечения качества программного продукта для целей проекта;

2) адаптировать выбранные методы для тестирования высоконагруженных систем;

3) описать и автоматизировать методику тестирования;

4) выявить аспекты, плохо поддающиеся автоматическому тестированию и исследо-

вать возможные варианты их преодоления.

Методика тестирования

Требования к качеству программного продукта были сформулированы в виде функциональных требований, требований к пропускной способности и требований к автоматическому восстановлению.

Проведены исследования подходов к тестированию каждой группы требований:

1. Согласно ТЗ система функционирует следующим способом: при изменении местоположения абонента в роуминге система запрашивает по абоненту дополнительную информацию из внешних систем и по заданным критериям определяет шаблон SMS сообщения. Данный шаблон может содержать специальные значения — маркеры, подставляемые системой, исходя из информации о стране пребывания, стоимости услуг, оператора регистрации.

Тестирование системы с полным перебором возможных состояний для данной системы было нереальным из-за сложной логики выбора шаблонов сообщений и различных вариантов подстановки специальных маркеров в шаблоны. Все это приводило к экспоненциальному росту числа возможных последовательностей событий, которые должны были бы тестироваться. Для проведения функционального тестирования системы было выбрано эффективное решение в виде двух моделей: первая — для тестирования возможности выбора всех шаблонов с фиксированными маркерами подстановки, вторая — для генерации всех возможных подстановок маркеров в фиксированный шаблон.

В изначальном плане тестирования не существовало требований к максимальному количеству сообщений на абонента. В результате проведенного исследования такое требование в план было введено. Тестирование проводилось после тестирования стабильности, где в результате недельного прогона фиксировались отправляемые сообщения, которые в дальнейшем проверялись на соответствие входным данным, на ограничение количества отправляемых сообщений.



2. Для оценки пропускной способности системы были применены следующие виды тестирования:

нагрузочное тестирование, обеспечивающее оценку времени обработки данных;

стресс-тестирование или тестирование стабильности, обеспечивающее оценку запаса производительности системы;

конфигурационное тестирование, обеспечивающее оценку влияния окружения на работу системы.

Анализ системы в ходе тестирования проводился на основе сбора системных метрик, сбора данных от среды исполнения (Java Virtual Machine), анализа времени ответа и пропускной способности всей системы. Предполагалось, что анализ системы может внести дополнительные издержки и исказить данные тестирования, по этой причине было запланировано повторное тестирование без анализа системных метрик и метрик JVM со сравнением результатов по критерию Стьюдента.

Нагрузочное тестирование используется для оценки времени обработки входных данных. При данном виде тестирования эмулируется обычный входной поток данных. Для времени обработки строится функция распределения, рассчитываются квантили. В качестве оценочного значения выбран квантиль при 99 % вероятности. Система написана на языке Java, для которого свойственны задержки при запуске сборки мусора. Чтобы оценить влияние данных пауз, производился анализ работы сборщика мусора, анализ swar системы [4].

Стресс-тестирование применяется для оценки запаса прочности системы относительно ожидаемой функциональности. Данный вид тестирования также предполагает сбор широкого спектра системных метрик, анализ которых позволяет выявить максимальную нагрузку на систему, сформулировать критические уровни нагрузки для системы мониторинга и выявить узкие места системы.

Тестирование стабильности предполагает работу под обычной нагрузкой на протяжении длительного периода времени. В нашем случае на суточном и недельном интервалах времени. Данный вид тестирования

позволяет выявить влияние редких событий, например, запуск систем архивации или задач Stop, на функционирование системы, а также выявить утечки системных ресурсов и проблемы Class Loader в Java.

Конфигурационное тестирование. В задаче тестирования пропускной способности системы происходил анализ влияния выделяемых ресурсов виртуальной машины на общую пропускную способность. Данный вид тестирования сводился к стресс-тестированию при изменяемых параметрах виртуальной машины.

3. Тестирование автоматического восстановления. Необходимо отметить, что тестируемая система должна функционировать на виртуальной машине, по этой причине анализ восстановления после аппаратных сбоев и миграции виртуальных машин в данной статье не рассматривается. В рамках тестирования автоматического восстановления системы протестировано восстановление отдельных процессов после экстренного завершения системы (kill -9 <pid>), в т. ч. автоматический запуск базы данных и ее диагностика. Восстановление доступа к внешним системам после сбоев в сети. Протестирован автоматический запуск системы после нормальной и экстренной перезагрузки системы.

Адаптация к нагрузке

Предполагалось, что нагрузочное тестирование системы удастся провести, используя реальный сетевой трафик в качестве входных данных, однако, выполнить зеркальное отображение трафика в сеть, где находилась тестовая лаборатория, не удалось. Также не удалось перенести недельный трафик из-за отсутствия требуемых ресурсов для хранения данных. В результате исследований было решено разбить тестирование на два этапа: тестирование с генерацией трафика в тестовой лаборатории и тестирование с «зеркалированием» трафика на этапе опытной эксплуатации.

Для создания генератора трафика был проведен анализ абонентов, выезжающих в роуминг (рассматривались такие параметры, как частота выезда; продолжительность пребывания; сообщения, посылаемые

в сигнальной сети оператора; количество посещаемых стран абонентом; характерные маршруты; аномальное поведение) [3]. В результате было создано несколько моделей в виде машин состояний, описывающих поведения абонентов в роуминге. В начале каждого 5-минутного интервала времени тестовой системой создавались новые тестовые абоненты в роуминге, дополнительно выбиралась часть абонентов, уже хранящихся в системе, по всем выбранным абонентам происходил переход в рамках их машины состояний и создавалось соответствующее событие, которое посылалось в систему. Данный подход позволил хранить только необходимый минимум информации (id абонента, id его машины состояний, id состояния в рамках машины состояний), а также позволил воссоздать воздействия, которые посылались на систему. Формально показано, что использование предложенного генератора трафика создает однотипную нагрузку с реальным потоком данных [5].

Автоматизация

Методика тестирования изначально разрабатывалась с учетом необходимости автоматизации рутинных, повторяющихся задач.

Цикл автоматизированного тестирования состоял из следующих этапов.

1. Запуск виртуальной машины из готового образа.
2. Назначение роли (типа тестирования) на виртуальной машине.
3. Настройка общего окружения средствами системы управления конфигурациями.
4. Настройка окружения в зависимости от роли (например, для анализа работы Java Virtual Machine на системе запускались сервисы jstatd, jfr).
5. Загрузка и сборка тестируемой системы из системы контроля версий.
6. Загрузка и запуск тестов в соответствии с ролью тестируемой системы.

На ручную работу оставалось только создание модели тестирования, настройка окружения и анализ результатов тестирования. Дополнительно, в ручном режиме просматривались журналы недельных те-

стов на предмет странного/подозрительного поведения, т. е. поведения системы, которое является ошибкой, но не описано ни в ТЗ, ни в тестовом плане (например, множественные отправки SMS одному человеку на пограничных областях).

Проблемы тестирования

Необходимо отметить, что данный подход не лишен недостатков, которые, к счастью, не влияют на основные результаты тестирования. В частности, не отражено тестирование систем мониторинга — важной части промышленной системы, что не было предусмотрено требованиями сдачи системы в эксплуатацию. Часть ошибок была найдена только в процессе ручного анализа журналов тестирования. Поскольку понятие странное/аномальное поведение не формализовано, то идентификация связанных с ним ошибок возможна только человеком, который по результатам их анализа создает новые требования в программе тестирования. Использование поведенческих моделей позволяет гарантировать тестирование программного продукта по критерию путей и, в случае необходимости, провести верификацию свойств модели [2].

Результаты

Исходный код, исследуемый в рамках методики, имеет объем 37 KLOC.

Выше рассматривались причины, по которым функциональное тестирование было разбито на два блока. Рассмотрим метрики тестирования по каждому направлению (табл.).

С помощью нагрузочного и стресс-тестирования получены следующие результаты:

- пропускная способность системы (предполагаемая нагрузка) 8 000–10 000 TPS;
- максимальная пропускная способность 18 000 TPS;
- среднее время обработки запроса 290 мс;
- дисперсия времени обработки 30 мс.

В ходе конфигурационного тестирования был представлен план выделения ресурсов виртуальной машине для задач масштабирования.

Метрики тестирования

Тестируемый функционал	Количество обнаруженных ошибок	Покрытие по путям, %
Тестирование шаблонов	108	100
Тестирование маркеров	24	100

В процессе тестирования восстановления ошибок не обнаружено.

Предложенная методика тестирования позволила с минимальными замечаниями начать этап опытной эксплуатации телекоммуникационной системы, обслуживающей 15 млн абонентов.

В дальнейшем предлагаемая методика может быть расширена использованием UCM поведенческих моделей для генерации трас при функциональном тестировании. Данная методика может быть применена и в области нотификации абонентов: оповещения МЧС, сообщения городской администрации и оповещения о стоимости услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майерс Г., Баджетт Т., Сандлер К. Искусство тестирования программ. 3-е изд. М.: Дialeктика, 2012. № 3(174). 272 с.
2. Никифоров И.В., Дробинцев П.Д., Котляров В.П. Методика проектирования тестов сложных программных комплексов на основе структурированных UCM моделей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. № 3(174).

- С. 99–105.
3. Janert Ph.K. Data Analysis with Open Source Tools. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2011.
4. Oaks Sc., Blanchette M. (eds.). Java Performance: The Definitive Guide. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2014.
5. Stewart W.J. Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modelling. Woodstock: Princeton Univercity Press, 2009.

REFERENCES

1. Mayers G., Badzhett T., Sandler K. *Iskusstvo testirovaniya programm*, Moscow: Dialektika Publ., 2012, No. 3(174), 272 p. (rus)
2. Nikiforov I.V., Drobintsev P.D., Kotlyarov V.P. Metodika proyektirovaniya testov slozhnykh programmnykh kompleksov na osnove strukturirovannykh UCM modeley [Formal models structurization based technique of complex software projects testing], *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie*. St. Petersburg: SPbGPU

- Publ., 2013, No. 3(174), Pp. 99–105. (rus)
3. Janert Ph.K. *Data Analysis with Open Source Tools*. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2011.
4. Oaks Sc., Blanchette M. (eds.). *Java Performance: The Definitive Guide*. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2014.
5. Stewart W.J. *Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modelling*. Woodstock: Princeton Univercity Press, 2009.

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович — профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vpk@spbstu.ru

KOTLYAROV, Vsevolod P. St. Petersburg State Polytechnical University. 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vpk@spbstu.ru

ИВАНОВ Александр Сергеевич — аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: al.s.ivanov@gmail.com

IVANOV, Aleksandr S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: al.s.ivanov@gmail.com



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

УДК 681.3.06

И.Г. Черноруцкий

ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ

I.G. Chernorutskiy

GRADIENT METHODS FOR LARGE-SCALE MINIMIZATION PROBLEMS

Разработаны градиентные методы с чебышевскими функциями релаксации. В отличие от классических градиентных процедур, построенные методы сохраняют сходимость и эффективность для невыпуклых задач нелинейного программирования в условиях высокой степени жесткости целевых функционалов и высокой размерности вектора оптимизируемых параметров.

ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ; ФУНКЦИИ РЕЛАКСАЦИИ; НЕВЫПУКЛЫЕ ЗАДАЧИ; ЖЕСТКИЕ ФУНКЦИОНАЛЫ.

Gradient methods with Chebyshev relaxation functions are developed. In contrast to the classical gradient procedures, the methods retain the convergence and efficiency for non-convex nonlinear programming problems under the conditions of high stiffness of target functionals and high dimension of the optimized parameters vector.

GRADIENT METHODS; RELAXATION FUNCTIONS; NON-CONVEX PROBLEMS; STIFF FUNCTIONALS.

Для решения задачи безусловной минимизации

$$J(x) \rightarrow \min_x, x \in R^n, J \in C^2(R^n)$$

рассматривается класс матричных градиентных методов вида

$$x^{k+1} = x^k - H_k(G_k, h_k)J'(x^k), \quad h_k \in R^1, \quad (1)$$

где $G_k = J''(x^k)$, H_k – матричная функция G_k .

Данный класс методов, как показано в работах [1–8], включает в себя как частные случаи такие классические процедуры, как градиентные методы наискорейшего спуска, методы Левенберга-Маркуардта, ньютоновские методы, методы с экспоненциальной релаксацией (ЭР-методы).

Далее представлен основанный на понятии функции релаксации [1, 6] подход к построению и анализу нетрадиционных градиентных методов с чебышевской функ-

цией релаксации. Основные предположения, используемые при построении данного класса методов:

- высокая размерность вектора аргумента x ($n \gg 1$) и нежелательность хранения полноразмерной матрицы ($n \times n$) в памяти компьютера;
- высокая степень жесткости [1, 4, 5] функционала $J(x)$ в широкой области изменения аргумента;
- выпуклость минимизируемого функционала $J(x)$ гарантируется только в окрестности точки минимума.

Задачи многопараметрической оптимизации

Под большими системами будем понимать системы, описываемые моделями с большим числом управляемых параметров. Если степень жесткости соответствующих критериев оптимальности достаточно высока, то стандартные вычислительные

средства оказываются неэффективными в силу изложенных в [1, 4, 5] причин. Методы с экспоненциальной релаксацией [8] неприменимы, т. к. их вычислительные схемы содержат заполненные матрицы размерности $n \times n$, что при больших (порядка 1000) n определяет чрезмерные требования к объему необходимой памяти компьютера. Методы ньютоновского типа, как показано в [8], не предназначены для решения невыпуклых задач и, кроме того, теряют эффективность в условиях высокой степени жесткости.

Наиболее часто в указанной ситуации рекомендуется применять различные нематричные формы метода сопряженных градиентов (СГ). Однако далее будет показано, что в классе матричных градиентных схем (1) существуют более эффективные для рассматриваемых задач алгоритмы, чем методы СГ.

Пусть оптимизируемая система может быть представлена как совокупность взаимосвязанных подсистем меньшей размерности. Пусть также требования к выходным параметрам системы (спецификации) могут быть сформулированы в виде следующих неравенств:

$$y_j(x^j, x^q) \leq t_j, j \in [1: q-1]; y_q(x^q) \leq t_q, \quad (2)$$

где x^j есть n_j -мерный частный вектор управляемых параметров; x^q — n_q -мерный вектор управляемых параметров, влияющий на все q выходных параметров и осуществляющий связь отдельных подсистем оптимизируемой системы. Размерность полного вектора управляемых параметров $x = [x^1, x^2, \dots, x^q]$ равна

$$n = \sum_{i=1}^q n_i. \quad (3)$$

Используя технику оптимизации, представленную в [1], можно привести задачу решения системы неравенств (1) к виду

$$J(x) = \sum_{j=1}^q \Psi_j(x^j, x^q) \rightarrow \min, x \in R^n, \quad (4)$$

что является сглаженным вариантом критерия минимального запаса работоспособности.

Функционалы (4) возникают и при других постановках задач оптимального пара-

метрического синтеза, не основанных непосредственно на критериях минимального запаса работоспособности. Поэтому задача (4) имеет достаточно общий характер.

Далее будут рассмотрены методы решения задачи (4) при следующих дополнительных предположениях:

- решение задачи анализа оптимизируемой системы требует значительных вычислительных затрат, поэтому в процессе оптимизации требуется минимизировать количество обращений к вычислению значений $J(x)$;

- коэффициент заполнения γ матрицы $G(x) = J''(x)$ достаточно мал. Обычно можно полагать $\gamma \sim 1/q$.

Легко установить, что структура матрицы $G(x)$ не зависит от точки x :

$$G(x) = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 & G_{1q} \\ & G_{22} & G_{2q} \\ 0 & & G_{33} & G_{3q} \\ & & & \ddots & \vdots \\ G_{q1} & G_{q2} & G_{q3} & \dots & G_{qq} \end{bmatrix}.$$

Подматрицы G_{jj} имеют размеры $n_j \times n_j$, а общее число ненулевых элементов равно

$$\sum_{i=1}^q n_i^2 + 2n_q \sum_{i=1}^{q-1} n_i.$$

Таким образом, учитывая симметричность матрицы $G(x)$, в памяти компьютера необходимо хранить

$$\sum_{i=1}^q (n_i^2 + n_i)/2 + n_q \sum_{i=1}^{q-1} n_i$$

ненулевых элементов. Необходимые сведения о схемах хранения разреженных матриц содержатся, например, в [9, 10].

Методы с чебышевскими функциями релаксации

Пусть $\lambda_i(G_k) \in [-m, M]$, $M \gg m > 0$. В силу приведенных выше предположений и сформулированных в [6] требований к функциям релаксации, наиболее рациональный метод должен иметь функцию релаксации, значения которой резко снижаются от $R = 1$ при $\lambda = 0$, оставаясь малыми во всем диапазоне $[0, M]$. И напротив, при $\lambda < 0$ функция $R(\lambda)$ должна

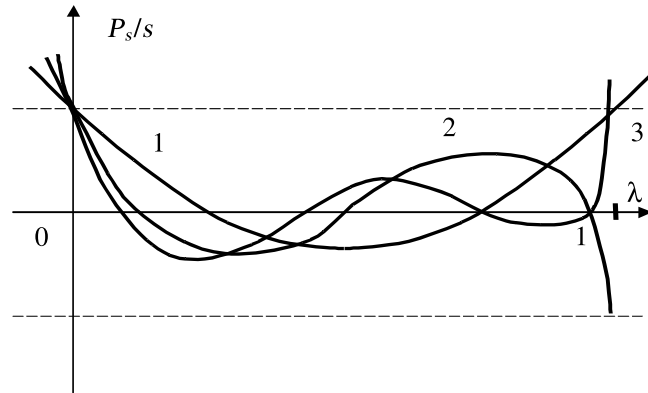


Рис. 1. Чебышевские функции релаксации

интенсивно возрастать. Кроме того, отвечающая $R(\lambda)$ матричная функция H должна строиться без матричных умножений для сохранения свойства разреженности матрицы $G_k = J''(x^k)$.

Покажем, что в качестве такой $R(\lambda)$ с точностью до множителя могут быть использованы смещенные полиномы Чебышева второго рода $P_s(\lambda)$, удовлетворяющие следующим соотношениям [11]:

$$\begin{aligned} P_1(\lambda) &= 1, P_2(\lambda) = 2(1 - 2\lambda); \\ P_{s+1}(\lambda) &= 2(1 - 2\lambda)P_s(\lambda) - P_{s-1}(\lambda). \end{aligned} \quad (5)$$

Графики зависимостей $P_s(\lambda)/s$ для $s = 3, 4, 5$ представлены на рис 1. Действительно, полагая $R(\lambda) = P_L(\lambda)/L$ при достаточно большом значении L получим сколько угодно быструю релаксацию любого слагаемого в представлении

$$f(x^{k+1}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \lambda_i R^2(\lambda_i), \quad (6)$$

где

$$x^k = \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} u^i.$$

Данное утверждение вытекает из известного факта равномерной сходимости последовательности $\{P_s(\lambda)/s\}$ к нулю при $s \rightarrow \infty$ на открытом промежутке $(0, 1)$. Далее будем предполагать, что собственные числа матрицы G_k нормированы к промежутку $(0, 1)$. Для этого достаточно вместо матрицы G рассматривать матрицу $G/\|G\|$, а вместо вектора градиента g — вектор $g/\|G\|$.

Отвечающая принятой $R(\lambda)$ зависимость $H(\lambda)$ имеет вид

$$H(\lambda) = [1 - R(\lambda)]/\lambda = [1 - P_L(\lambda)/L]/\lambda. \quad (7)$$

Построение методов (1) непосредственно с функцией (7) возможно, но приводит к необходимости решения на каждом шаге по k больших линейных систем уравнений с разреженной матрицей. Ниже показано, что существуют более эффективные приемы реализации.

Из (7) следует, что $H(\lambda)$ является полиномом степени $L - 2$, в то время как $R(\lambda)$ имеет степень $L - 1$. Поэтому для реализации матричного градиентного метода с указанной функцией $H(\lambda)$, вообще говоря, нет необходимости решать линейные системы. Метод будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k - (\alpha_1 E + \alpha_2 G_k + \dots + \alpha_{L-1} G_k^{L-2}) g^k = \\ &= x^k - H(G_k) g^k. \end{aligned} \quad (8)$$

Реализация метода (8) может быть основана на методах вычисления коэффициентов α_i для различных степеней L . При этом число L должно выбираться из условия наиболее быстрого убывания $J(x)$. Далее обсуждается альтернативный подход, основанный на других соображениях.

Для функции

$$H_s(\lambda) \triangleq \alpha_1 + \alpha_2 \lambda + \dots + \alpha_{s-1} \lambda^{s-2}, \quad s = 2, 3, \dots$$

из (5) можно получить рекуррентное соотношение

$$\begin{aligned} (s+1)H_{s+1} &= 2s(1 - 2\lambda)H_s - (s-1) \times \\ &\times H_{s-1} + 4s; \end{aligned}$$

$$H_1 = 0, H_2 = 2, s \in [2: L-1]. \quad (9)$$

Отсюда имеем

$$\begin{aligned} x^{k+1}[s+1] &\triangleq x^k - H_{s+1}g^k = \\ &= x^k - \frac{2s}{s+1}(E - 2G_k)H_s g^k + \frac{s-1}{s+1}H_{s-1}g^k - \\ &\quad - \frac{4s}{s+1}g^k, s \in [2 : L-1] \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \vartheta_{s+1} &\triangleq x^{k+1}[s+1] - x^k = \\ &= \frac{2s}{s+1}(E - 2G_k)\vartheta_s - \frac{s-1}{s+1}\vartheta_{s-1} - \frac{4s}{s+1}g^k; \quad (10) \\ \vartheta_1 &= 0, \vartheta_2 = -2g^k, s \in [2 : L-1]. \end{aligned}$$

Здесь $x^{k+1}[s]$ есть s -е приближение к вектору $x^{k+1} = x^{k+1}[L]$.

Таким образом, при фиксированной квадратичной аппроксимации $f(x)$ функционала $J(x)$ в окрестности $x = x^k$, мы имеем

s	...	3	4	5	6	7	8
R_s	...	0,333	0,272	0,250	0,239	0,233	0,230
α_s	...	0,147	0,092	0,061	0,044	0,033	0,025
β_s	...	0,853	0,908	0,939	0,956	0,967	0,975
$-R'_s(0)$	...	5,30	10,0	16,0	23,3	32,0	42,0

В левой части спектра ($\lambda < 0$) имеем $R_s(\lambda) > 1 + R'_s(0)\lambda$, поэтому значения производных $R'_s(0)$ в последней строке таблицы характеризуют множители релаксации для отрицательных слагаемых в (6). Вычисление производных $R'_s(0)$ может быть выполнено, исходя из следующих рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned} P'_1 &= 0, P'_2 = -4; P'_{s+1} = \\ &= 2P'_s - 4s - P'_{s-1}; R'_L(0) = P'_L/L. \end{aligned}$$

Значения α_s, β_s для $s > 8$ (при $\lambda > 0$) могут быть вычислены по асимптотической формуле:

$$\alpha_s = 1,63/s^2, \beta_s = 1 - \alpha_s; \quad (11)$$

при этом $R_s < 0,22$.

Соотношение (11) получается из следующего представления полиномов Чебышева:

$$P_L(\lambda) = \frac{\sin L\zeta}{L \sin \zeta}, \lambda = \sin^2 \frac{\zeta}{2}, \lambda, \zeta \in [0, 1].$$

Действительно, при достаточно малых ζ

возможность переходить от P_s к P_{s+1} за счет одного умножения матрицы $E - 2G_k$ на вектор ϑ_s , в полной мере используя свойство разреженности матрицы G_k и не прибегая к дополнительным вычислениям градиента. Эффективность алгоритма (9) при больших значениях η определяется множителями релаксации для малых собственных значений матрицы G_k . Рассмотрим положительную часть спектра ($\lambda > 0$), что особенно важно в окрестности оптимума, где матрица $G(x)$ положительно определена. Основное достоинство метода с $R_s(\lambda) = P_s(\lambda)/s$ состоит в том, что уже при малых s происходит заметное подавление слагаемых из (5) в широком диапазоне значений λ . Ниже представлены значения R_s для внутреннего максимума $R_s(\lambda)$ и границы диапазонов $\alpha_s \leq \lambda \leq \beta_s$, где $|R'_s(\lambda)| \leq R_s$:

имеем [12]:

$$P_L(\lambda) \cong \Phi(\xi) = \frac{\sin \sqrt{\xi}}{\sqrt{\xi}}, \xi \triangleq 4L^2\lambda.$$

Полагая $x = \sqrt{\xi}$, получим $\Phi(\xi) = \varphi(x) = \sin x / x$. Имеем $\Phi(\xi) \leq \Phi(\xi_{кр})$ при $\xi \geq \xi_{кр}$, где $\xi_{кр} = x_{кр}^2 = 6,523$; $\Phi(\xi_{кр}) = \varphi(x_{кр}) \cong 0,22$.

Таким образом, полагая $\xi_{кр} = 4L^2\lambda_{кр}$, получим следующее утверждение: если для наименьшего (положительного) собственного числа m выполняется неравенство

$$\xi_{\min} = 4L^{2m} \geq \xi_{кр} = 6,523,$$

то есть если

$$m \geq 6,523/(4L^2) = 1,63/L^2, \quad (12)$$

то для всех $\lambda > m$ будем иметь

$$|R_L(\lambda)| \leq 0,22.$$

Из (12) следует (11).

Узкая схема алгоритма, построенного на основе соотношения (10), может быть реализована с помощью следующей последовательности шагов. При



этом предполагается, что все переменные задачи надлежащим образом нормализованы. Предполагается также, что переменные пронумерованы некоторым оптимальным способом, гарантирующим эффективное хранение разреженной матрицы $(E - G_k)$ в памяти компьютера.

Алгоритм RELCH

Шаг 1. Задать начальную точку x ; вычислить $J := J(x)$; задать L , определяющее количество пересчетов по формуле (10) (об априорном выборе L см. ниже).

Шаг 2. Вычислить $g := J'(x)$, $G := J''(x)$; положить $g := g / \|G\|$, $G := G / \|G\|$; $\alpha := 1$.

Шаг 3. По формуле (10) построить ϑ_L ; положить $x' := x + \vartheta_L$.

Шаг 4. Вычислить $J_t := J(x')$. Если $J_t > J$, перейти к шагу 5, иначе — к шагу 6.

Шаг 5. Положить $\alpha := \alpha/2$, $x' := x + \alpha\vartheta_L$ и перейти к шагу 4.

Шаг 6. Положить $x := x'$, $J := J_t$ и перейти к шагу 2.

Критерий окончания процесса здесь не указан. Как правило, вычисления заканчиваются по исчерпанию заданного количества вычислений функционала либо при явной остановке алгоритма. Число пересчетов L по формуле (10) является параметром, задаваемым пользователем. Согласно (11) первоначально целесообразно полагать

$$L \cong \sqrt{1,63/\alpha_L} \cong 1,3\sqrt{\eta},$$

где η — оценка степени овражности минимизируемого функционала. При таком выборе L множители релаксации в положительной части спектра будут гарантированно меньше 0,23. При конструировании алгоритмических способов задания L необходимо учитывать, что последовательность $\{J_s\}$, где $J_s \triangleq J(x^k + \vartheta_s)$, не будет при $s \rightarrow \infty$ убывать монотонно. На шаге 5 алгоритма применена регулировка нормы вектора продвижения с целью предотвращения выхода из области справедливости локальной квадратичной модели функционала.

Характеристики сходимости

Дадим оценку эффективности метода (10) по сравнению с методами сопряженных градиентов (СГ-методами). Для задач

большой размерности (когда число итераций меньше размерности) можно гарантировать сходимость СГ-методов только со скоростью геометрической прогрессии даже для сильно выпуклых квадратичных функционалов.

Действительно, рассмотрим случай $f(x) = 1/2 \langle Gx, x \rangle$, $G > 0$ и оценим скорость сходимости метода СГ к экстремальной точке $x = 0$. Итерация x^k , полученная методом СГ, может быть представлена в виде [11]:

$$x^k = (E + c_1 G + c_2 G^2 + \dots + c_k G^k) x^0 = P_k(G) x^0,$$

где $P_k(G)$ — матричный полином k -й степени. При этом из свойств метода СГ следует, что коэффициенты $c_1, \dots, c_k$ полинома $P_k(G)$ на каждой итерации принимают такие значения, чтобы минимизировать величину $f(x^k)$, только множителем отличающуюся от функции ошибки. Иначе говоря, k -е приближение минимизирует $f(x^k)$ среди векторов $x^0 + V$, где вектор V является элементом подпространства, натянутого на векторы $Gx^0, G^2x^0, \dots, G^kx^0$. Полагая

$$x^0 = \sum_{i=1}^n \xi_{i,0} u^i,$$

где $\{u^i\}$ — ортонормальный базис собственных векторов матрицы G , получим

$$x^k = P_k(G) \sum_{i=1}^n \xi_{i,0} u^i = \sum_{i=1}^n \xi_{i,0} P_k(\lambda_i) u^i, \quad P_k(0) = 1,$$

$$f(x^k) = 1/2 \langle Gx^k, x^k \rangle = 1/2 \sum_{i=1}^n \xi_{i,0}^2 P_k^2(\lambda_i) \lambda_i. \quad (13)$$

Отсюда имеем

$$\|x^0\|^2 = \sum_{i=1}^n \xi_{i,0}^2,$$

$$\|x^k\|^2 = \sum_{i=1}^n \xi_{i,0}^2 P_k^2(\lambda_i) \leq \max_i P_k^2(\lambda_i) \|x^0\|^2. \quad (14)$$

Выберем в качестве полинома $P_k(\lambda)$ близкий к оптимальному полином, наименее уклоняющийся от нуля на промежутке $[m, M]$, содержащем все собственные значения положительно определенной матрицы G , и нормированный так, что $P_k(0) = 1$.

Линейной заменой переменных

$$\lambda = \frac{M+m}{2} - \frac{M-m}{2}t$$

задача сводится к построению полинома, наименее отклоняющегося от нуля на промежутке $t \in [-1, 1]$ и принимающего в точке $t_0 = (M+m)/(M-m)$ (соответствующей $\lambda = 0$) значение 1. Решение последней задачи дается полиномом

$$\tilde{T}_k(t) = \frac{T_k(t)}{\cos(k \arccos t_0)} = \frac{T_k(t)}{T_k(t_0)},$$

где $T_k(t) = \cos(k \arccos t)$ – полином Чебышева. При этом

$$\max_{-1 \leq t \leq 1} |\tilde{T}_k(t)| = \frac{1}{|T_k(t_0)|} \max_{-1 \leq t \leq 1} |T_k(t)|.$$

Очевидно,

$$\max_{-1 \leq t \leq 1} |T_k(t)| = 1,$$

поэтому

$$L_k = \max_{\lambda} |P_k(\lambda)| = \max_t |\tilde{T}_k(t)| = \frac{1}{|T_k(t_0)|}, \lambda \in [m, M], t \in [-1, 1].$$

Так как справедливо представление

$$T_k(t) = 0,5 \left[(t + \sqrt{t^2 - 1})^k + (t - \sqrt{t^2 - 1})^k \right],$$

то

$$L_k = 2 \left/ \left[\left(\frac{M+m}{M-m} + \sqrt{\left(\frac{M+m}{M-m} \right)^2 - 1} \right)^k + \left(\frac{M+m}{M-m} - \sqrt{\left(\frac{M+m}{M-m} \right)^2 - 1} \right)^k \right] \right. = \\ = 2 \left/ \left[\left(\frac{\sqrt{M} + \sqrt{m}}{\sqrt{M} - \sqrt{m}} \right)^k + \left(\frac{\sqrt{M} - \sqrt{m}}{\sqrt{M} + \sqrt{m}} \right)^k \right] \right..$$

При достаточно больших k ($k \geq k_0$) имеем

$$L_k \cong 2 \left/ \left(\frac{\sqrt{M} + \sqrt{m}}{\sqrt{M} - \sqrt{m}} \right)^k \right. = \\ = 2 \left(\frac{\sqrt{\eta} - 1}{\sqrt{\eta} + 1} \right)^k \cong 2 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\eta}} \right)^k, \eta \triangleq \frac{M}{m}. \quad (15)$$

Из (13) и (14) получаем

$$\|x^k\| \leq L_k \|x^0\|$$

или

$$\|x^k\| \leq 2q^k \|x^0\|, k \geq k_0, \quad (16)$$

где $q \cong (1 - 2/\sqrt{\eta})$. Таким образом, сходимость метода СГ со скоростью геометрической прогрессии доказана. Точное значение L_k , справедливое для любых k , будет при этом равно

$$L_k = 2 \left/ \left[\left(1 + \frac{2}{\sqrt{\eta}} \right)^k + \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\eta}} \right)^k \right] \right., L_0 = 1.$$

Из (16) следует, что при $\eta \gg 1$ сходимость может быть очень медленной.

«Конечность» метода СГ, т. е. точное решение задачи минимизации квадратичной функции за n шагов, где n – размерность пространства поиска, проявляется только при достаточно большом количестве итераций. При этом степень полинома $P_k(\lambda)$ в (13) будет равна n , и оптимальный выбор этого полинома сводится к локализации его n корней в точках $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, что приведет к точному решению задачи ($f(x^n) = 0$).

Легко видеть, что оценка (16) для квадратичной функции общего вида

$$f(x) = 1/2 \langle Gx, x \rangle - \langle G, x \rangle + c$$

преобразуется к виду

$$\|x^k - x^*\| \leq 2q^k \|x^0 - x^*\|, \quad (17)$$

где x^* – оптимальная точка, не совпадающая в общем случае с началом координат.

Важная особенность алгоритмов типа RELCH заключается в том, что соответствующие множители релаксации будут определяться только числом итераций L и степенью η жесткости задачи независимо от размерности n . В то же время в схемах методов СГ для завершения каждого цикла спуска требуется порядка n итераций; в противном случае согласно (17) скорость сходимости может быть очень малой. Кроме того, каждая итерация метода СГ даже для квадратичного случая требует нового вычисления градиента, т. е. дополнительных вычислительных затрат по анализам функционирования оптимизируемой системы.

Будем далее полагать, что алгоритм RELCH реализован с постоянным $L = 1,3\sqrt{\eta}$, имея в области $\lambda > 0$ множители релаксации, не превышающие значения 0,23.

Рассмотрим задачу минимизации квадратичного функционала $f(x) = 1/2 \langle Gx, x \rangle$ с положительно определенной матрицей G . Оценим количество вычислений $f(x)$, требуемое для достижения контрольного вектора x' с нормой $\|x'\| \leq 0,23$ методом СГ и алгоритмом RELCH из начальной точки x^0 с $\|x^0\| = 1$. По достижении точки x' вся ситуация повторяется, поэтому полученные ниже сравнительные оценки эффективности имеют достаточно общий характер.

Будем предполагать, что для вычисления производных применяются двусторонние конечноразностные соотношения, что в следующем ниже анализе дает дополнительные преимущества методу СГ.

Для достижения вектора x' алгоритму RELCH требуется вычислить в точке x^0 слабо заполненную матрицу Гессе и вектор градиента $f'(x^0)$. При коэффициенте заполнения γ это потребует около $2\gamma n^2$ вычислений f . Далее выполняется $L = 1,3\sqrt{\eta}$ итераций по формуле (10), не требующих дополнительных вычислений целевого функционала f .

Чтобы получить вектор x' методом СГ требуется N итераций, где число N определяется из условия:

$$\|x^N\| = 2q^N = 0,23,$$

то есть $N \cong -2,2 / \ln q$. Для выполнения каждой итерации необходимо обновление вектора градиента, что связано с $2n$ вычислениями $f(x)$. Общее число вычислений f равно $-4,4n / \ln q$. Относительный выигрыш в количестве вычислений f методом RELCH по сравнению с методом СГ задается функцией $\Psi(\eta) \cong -2,2 / (\gamma n \ln q)$. Очевидно, при $\eta \rightarrow \infty$ имеем $q(\eta) \rightarrow 1$ и $\Psi(\eta) \rightarrow \infty$. Характерные значения Ψ для $\gamma = 0,01$ и $n = 1000$ даны ниже:

η	...	100	1000	1500	10^4	10^5
Ψ	...	1,0	3,4	4,0	11,0	35,0

Таким образом, для получения сравнимых результатов при $\eta = 10^4$ алгорит-

му RELCH потребуется приблизительно в 11 раз меньше вычислений f , чем методу СГ. Следует, однако, учитывать, что при увеличении η возрастает количество L пересчетов по формуле (10). Это может приводить к возрастанию влияния вычислительных погрешностей при вычислении ϑ_s , с большими номерами s .

Пример. Рассмотрим модельную задачу минимизации квадратичного функционала $f(x)$ с $n = 200$, $\eta = 1500$, $\gamma = 0,025$. Для определенности положим, что время однократного вычисления $f(x)$ эквивалентно выполнению 10^{2n} операций умножения с плавающей точкой. Время выполнения одной операции умножения для определенности и чисто условно положим равным $t_y = 3 \cdot 10^{-5}$ с. Вычисление значения $f(x)$ занимает при этом $t_f = 0,6$ с процессорного времени. Для вычисления f' и f'' с помощью общих конечноразностных формул требуется, соответственно, $t' = 2nt_f = 4$ мин, $t'' = 2\gamma n^2 t = 20$ мин. Число пересчетов по формуле (10) равно $L = 1,3\sqrt{\eta} = 50$. При каждом пересчете производится умножение слабо заполненной матрицы $E - 2G_k$ на вектор ϑ_s , что требует $\gamma n^2 t_y \cong 3 \cdot 10^{-2}$ с машинного времени. Время построения вектора ϑ_{50} без учета вычисления f', f'' составит около $50 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 1,5$ с и может в расчет не приниматься.

В результате получается, что для построения контрольного вектора x' с $\|x'\| < 0,23$ методом RELCH потребуется около $t'' = 20$ мин машинного времени. Метод СГ затратит, соответственно $\Psi(1500) \cdot 20 \cong 1,3$ ч.

При повторном применении алгоритма RELCH к построенному вектору x' мы получим вектор x'' с $\|x''\| \leq 0,23\|x'\|$ и т. д. Следовательно, если обозначить соответствующую последовательность векторов через $\{x^m\}$, то норма вектора x будет убывать по закону геометрической прогрессии $\|x^m\| \leq d^m \|x^0\|$, где $d < 0,23$ независимо от величины η и n .

Важным дополнительным преимуществом алгоритма RELCH по сравнению с методом СГ является его высокая эффективность в невыпуклом случае, т. к.

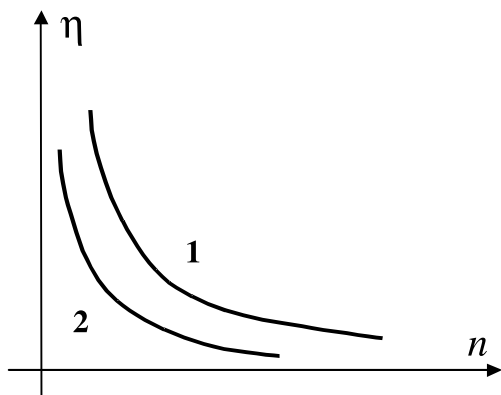


Рис. 2. Области работоспособности алгоритмов RELEX, RELCH $\varepsilon_M = \varepsilon'_M(1)$; $\varepsilon_M = \varepsilon''_M > \varepsilon'_M(2)$

функция релаксации метода в левой полуплоскости целиком расположена в разрешенной области и множители релаксации для $\lambda < 0$ быстро растут по абсолютной величине при переходе от ϑ_s к ϑ_{s+1} . Характеристики роста были приведены ранее.

Так же как и в случае ЭР-методов можно показать, что эффективность рассматриваемого подхода сохраняется при степенях жесткости, удовлетворяющих неравенству $\eta < 1/(n\varepsilon_M)$. Области работоспособности алгоритмов RELEX (ЭР-метод) и RELCH в плоскости (n, η) представлены на рис. 2. При умеренных размерностях n более эффективными, вообще говоря, оказываются алгоритмы типа RELEX. Они позволяют за меньшее число N_y операций умножения ма-

трицы на вектор получить заданные значения множителей релаксации. При больших η это приводит к существенному уменьшению накопленной вычислительной погрешности. Для подтверждения данного замечания достаточно проанализировать характер изменения множителей релаксации при применении формул пересчета при реализации ЭР-методов и (10). Характерные зависимости для рассмотренных случаев (для фиксированного $\lambda_i < 0$) и разных ε_M представлены на рис. 3.

Видно, что если область локальной квадратичности функционала $J(x)$ невелика (ζ_k мало), то необходимые значения $|R_i| \cong 1$ и более эффективными могут оказаться методы типа RELCH.

Описанный класс матричных градиентных методов показал на практике достаточно эффективную работу в условиях высокой жесткости и невыпуклости целевых функционалов. При оптимизации больших систем удастся использовать эффективные «упакованные» формы хранения матриц вторых производных, что существенно снижает требования к необходимой компьютерной памяти. Однако метод сохраняет свои основные характеристики и для малоразмерных систем, выдерживая конкуренцию с основными оптимизационными процедурами нелинейного программирования.

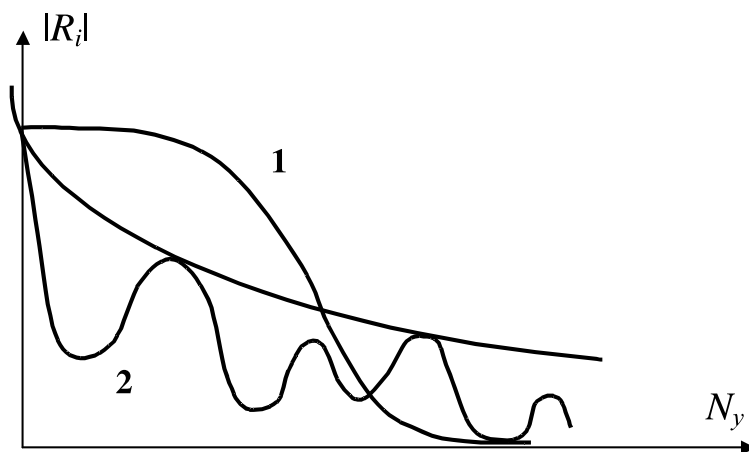


Рис. 3. Характер изменения множителей релаксации: 1 – RELEX, 2 – RELCH



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черноруцкий И.Г.** Методы оптимизации. Компьютерные технологии. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 384 с.
2. **Черноруцкий И.Г.** Методы параметрической оптимизации в задачах идентификации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 2(76). С. 150–155.
3. **Черноруцкий И.Г.** Параметрические методы синтеза систем управления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 2(76). С. 111–115.
4. **Черноруцкий И.Г.** Алгоритмические проблемы жесткой оптимизации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 6(162). С. 141–152.
5. **Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г.** Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979. 208 с.
6. **Черноруцкий И.Г.** Функции релаксации градиентных методов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 3(150). С. 66–72.
7. **Черноруцкий И.Г.** Некоторые стандартные схемы параметрической оптимизации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 6(162). С. 128–133.
8. **Черноруцкий И.Г.** Градиентные методы с экспоненциальной функцией релаксации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. № 5 (181). С. 58–66.
9. **Брамеллер А., Аллан Р., Хэмэм Я.** Слабозаполненные матрицы. М.: Энергия, 1979.
10. **Джордж А., Лю Дж.** Численное решение больших разреженных систем уравнений. М.: Мир, 1984.
11. **Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1963.
12. **Ланцош К.** Практические методы прикладного анализа. М.: Физматгиз, 1961.

REFERENCES

1. **Chernorutskiy I.G.** *Metody optimizatsii. Kompyuternyye tekhnologii.* St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2011, 384 p. (rus)
2. **Chernorutskiy I.G.** *Metody parametricheskoy optimizatsii v zadachakh identifikatsii* [Methods of parametrical optimisation in identification problems], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 2(76), Pp. 150–155. (rus)
3. **Chernorutskiy I.G.** *Parametricheskkiye metody sinteza sistem upravleniya* [Parametrical methods of synthesis of control systems], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 2(76), Pp. 111–115. (rus)
4. **Chernorutskiy I.G.** *Algoritmicheskkiye problemy zhestkoy optimizatsii* [Algorithmic problems of stiff optimization], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 6(162), Pp. 141–152. (rus)
5. **Rakitskiy Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskiy I.G.** *Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem.* Moscow: Nauka Publ., 1979, 208 p. (rus)
6. **Chernorutskiy I.G.** *Funktsii relaksatsii* [Relaxation function of gradient methods], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 3(150), Pp. 66–72. (rus)
7. **Chernorutskiy I.G.** *Nekotoryye standartnyye skhemy parametricheskoy optimizatsii* [Standard schemes of parametric optimization], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 6(162), Pp. 128–133. (rus)
8. **Chernorutskiy I.G.** *Gradiyentnyye metody s eksponentsialnoy funktsiyey relaksatsii* [Gradient methods with exponent relaxation function], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2013, No. 5 (181), Pp. 58–66. (rus)
9. **Brameller A., Allan R., Khemem Ya.** *Slabozapolnennyye matritsy.* Moscow: Energiya Publ., 1979. (rus)
10. **Dzhordzh A., Lyu Dzh.** *Chislennoye resheniye bolshikh razrezhennykh sistem uravneniy.* Moscow: Mir Publ., 1984. (rus)
11. **Faddeyev D.K., Faddeyeva V.N.** *Vychislitelnyye*

metody lineynoy algebry. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1963. (rus)

12. **Lantsosh K.** *Prakticheskiye metody prikladnogo analiza*. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1961. (rus)

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — заведующий кафедрой информационных и управляющих систем Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: igcher1946@mail.ru

CHERNORUTSKIY, Igor G. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: igcher1946@mail.ru



УДК 656, 004.89, 510.67

Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов

О ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov

ABOUT LOGICAL-ALGEBRAIC DESCRIPTION OF THE TRANSPORT LOGISTIC PROCESS

Проведен анализ предметной области. Дано логико-алгебраическое представление транспортно-логистической системы, с единых позиций введены формальные описания элементарной операции, транспортно-логистической операции, транспортно-логистического процесса. Семантика транспортно-логистического процесса интерпретирована логикой исчисления предикатов. Интеллектуализация транспортно-логистической системы связана с самоорганизацией транспортно-логистического процесса и с автоматным поиском решений в пространстве его состояний. Адекватность модели продемонстрирована на практическом примере.

ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ; ЛОГИКА ПРЕДИКАТОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА; ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ.

Analysis of the publications on the subject of the article is carried out in the article. A logical and algebraic description of the transport and logistics system is being given, a formal description of the unit operations, transport and logistics operations, transportation and logistics process are introduced. Semantics of the transport logistics operation is interpreted by logic of the predicate calculus. Intellectualization of the transport logistics system is associated with self-organization of the transport logistics process and with automatic search of solutions in the space of states. The adequacy of the model is demonstrated by the practical example.

LOGIC-ALGEBRAIC MODELS OF TRANSPORT PROCESSES; INTELLECTUALIZATION TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM; THE FIRST-ORDER PREDICATE LOGIC; SET-THEORETIC MODELS.

Тема статьи находится на пересечении ряда актуальных научно-практических направлений: транспорта, логистики, кибернетики, непосредственно касающихся проблем оптимальной организации транспортно-логистической системы (ТЛС) [1–3] и интеллектуализации процессов производства, хранения, транспортировки и распределения материальных потоков [3–5].

Одним из магистральных направлений развития ТЛС является их всесторонняя интеллектуализация.

Развитие спутниковых систем связи, информационных и компьютерных технологий [6], аппаратной реализации функций управления процессами в ТЛС, приближение средств обработки информации к месту ее возникновения, свидетельствуют о движении к использованию принципов са-

моорганизации в управлении ТЛС и принципов автоматического поиска решений в пространстве их состояний.

Концептуальные основы построения самоорганизующихся транспортных систем (ТС) рассмотрены в [7, 8], технология анализа транспортных процессов (ТП) в [9], принципы построения экспертных систем в [10], но применительно к ТЛС, принадлежащим к неизмеримо более широкому классу больших систем, даже не затрагивались. Тем более не ставилась задача определения единого математического инструмента описания поведения ТЛС, что ведет не только к сокращению издержек на проектирование и имитационное моделирование поведения ТЛС, но и к алгоритмической и структурной однородности самих систем.

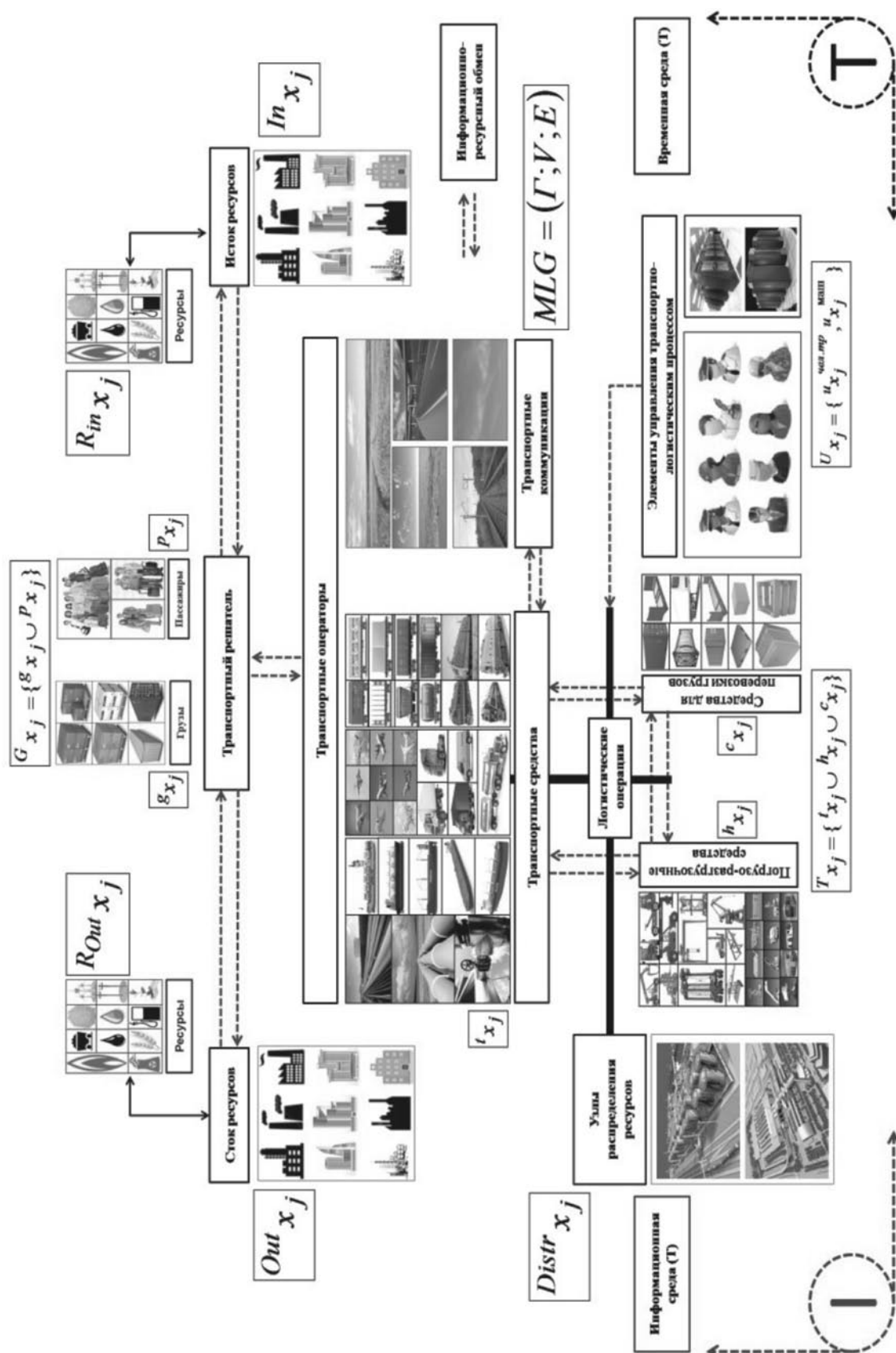


Рис. 1. Формальное представление ТЛС

Выбор логико-алгебраического представления вызван стремлением формально описать реальные процессы [11], протекающие в ТЛС. Структурное построение подобных моделей выполняется согласно [12], разрешение проблем прагматики и семантики модели - согласно [13] с использованием лингвистической концепции [12, 14], при этом достигается адекватность модели исходной предметной области и определенный автоматизм ее составления.

Этому, по-существу, и посвящена настоящая работа, и изложение ее сути уместно начать с определения концептуальной модели ТЛС как отправной точки в построении систем любой сложности.

Формальное представление транспортно-логистической системы. Опираясь на теорию отношений [1], ТЛС (рис 1) отождествляется с погруженной в информационную I и временную T среды тройки объектов X, W, L , то есть

$$TLS : (\langle X, W, L \rangle)_T, \quad (1)$$

где $X = \{x_j, j = 1, \dots, m\}$ – функциональное ресурсное множество; $W = \{Y, U_L^Y\}$ – нагруженное множество операций, такое что

$Y = \{y_i, i = 1, \dots, n\}$ – множество операций;

$U_L^Y = \left\{ u_i^{y_i}, i = 1, \dots, n \right\}$ – множество условий

выполнения операций; $L: W \rightarrow X$ множество отображений, обеспечивающих оборот ресурсов в ТЛС.

Оставляя за скобками поэлементное разукрупнение ТЛС (с ее подробным изложением можно познакомиться в [15, 16]), приступим к формальному описанию транспортно-логистических процессов (ТЛП).

Элементарная операция. Под элементарной операцией (ЭО) над ресурсом будем понимать действие, приводящее к изменению состояния ресурса, в отношении которого оно осуществляется.

Данное определение в логико-алгебраической форме записи представим в виде следующего выражения:

$$y_i(S_j^{k_1}) \rightarrow S_j^{k_2}. \quad (2)$$

Структурно процесс формирования ЭО представлен схемой на рис. 2.

Пусть каждой ЭО $y_i(S_{j=1}^k; S_{j=2}^k)$ соответствует множество $\{u_i^{y_i}\}$ условий ее выполнения:

$$y_i(S_{j=1}^k; S_{j=2}^k) \rightarrow \{u_i^{y_i}\}. \quad (3)$$

Пусть каждому ресурсу x_j соответствует множество S_j^k его состояний или фаз:

$$x_j \rightarrow S_j^k = \{S_j^k, k = 1, \dots, K\}. \quad (4)$$

Поскольку выполнение ЭО зависит от наличия соответствующих ресурсов, определяемых множеством состояний S_j^k , условие согласования ресурсов и операций можно представить выражением:

$$|u_i^{y_i} \cap S_j^k| \leq 1, \quad (5)$$

где скобки $|\dots|$ означают мощность (или меру) множества $u_i \cap S_j^k$, соответствующую тому, что каждое множество $u_i^{y_i}$ содержит не более одной фазы (состояния) из каждого множества S_j^k , т. е. каждый ресурс в фиксированный момент времени практически не может находиться более чем в одном состоянии или в одной фазе.

Таким образом, состояние ресурса или его фаза может быть пропорциональна интервалу или моменту времени, в котором рассматривается ресурс:

$$k \sim [\tau_{\text{def}} \vee (\tau_i; \tau_{i+1})], \quad (6)$$

где τ_{def} – определенный момент времени; $(\tau_i; \tau_{i+1})$ – определенный интервал времени.

Согласно предложенному определению ЭО (рис. 3), действие приводит к изменению состояния ресурса, при этом процесс

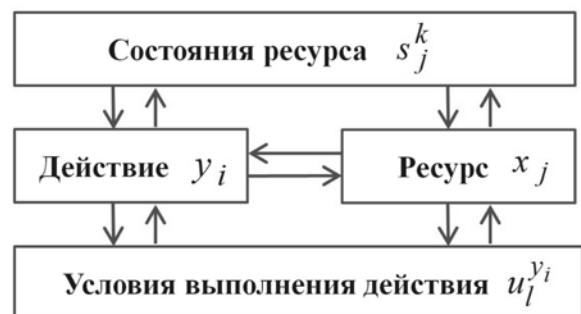


Рис. 2. Процесс формирования ЭО

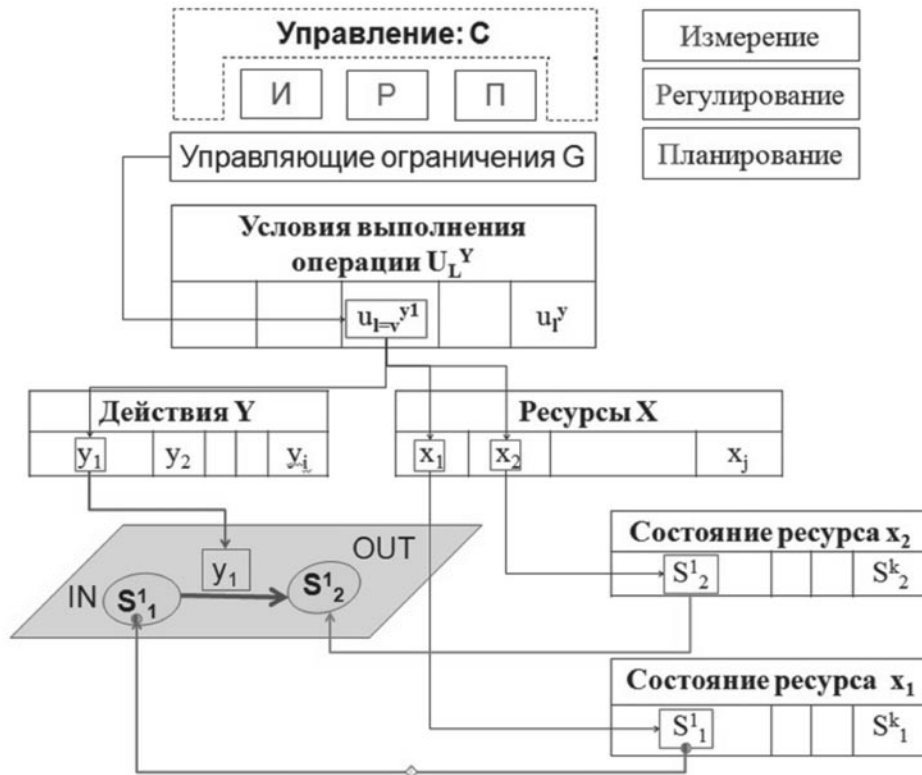


Рис. 3. Процедура формирования ЭО

организации и выполнения ЭО протекает в пространстве и времени, является целенаправленным и связан с наличием некоторого функционала управления C [9], удовлетворяющего заданному множеству ограничений G , накладываемых на входные IN и выходные OUT параметры ЭО, и критерий качества управления Q_m :

$$C : IN \xrightarrow[Q_m]{G} OUT$$

$$G = \bigcup_{i=1}^n G_i, \quad Q_m = \bigcup_{j=1}^m Q_j, \quad (7)$$

$$IN = \{S_j^{k=m}; u_l^{y=a}\}, \quad OUT = \{S_j^{k=n}; u_l^{y=b}\}.$$

Роль параметров IN и OUT играют соответственно значения интегральных показателей состояния ресурса и условий выполнения в виде реальных или прогнозных значений весовых коэффициентов, а параметр Q_m является интегральной величиной, характеризующей качество управления ЭО.

Процедура формирования ЭО операции образно отображена на рис. 3.

Транспортно-логистическая операция. Транспортно-логистическая операция (ТЛО) – определенным образом организованная во времени последовательность выполнения действий, позволяющая достигнуть заданных показателей этого процесса. Процесс формирования ТЛО условно представлен на рис. 4.

Пусть для выполнения ТЛО всегда имеются и доступны в любой момент времени необходимые ресурсы и возможность выполнения действий над ними.

Тогда, предполагая наличие у каждого состояния ресурса двух модальностей («наличие ресурса» (s_j^k) и «отсутствие оно» ($\neg s_j^k$)) и определяя конъюнкции на множествах U_L^Y , операционный процесс можно представить формулой F_i^{kf} в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) в виде:

$$F_i^{kf} = \bigvee_{l=1}^L \bigwedge_{j=1}^m S_{ij}^k, \quad (8)$$



Рис. 4. Процесс формирования ТЛО

$$F_i^{kf} = \underbrace{[(s_j^k, \dots, \neg s_j^k) \wedge (s_j^k, \dots, \neg s_j^k)]}_{S_{il}^k} \vee \dots \vee \underbrace{[(s_j^k, \dots, \neg s_j^k) \wedge (s_j^k, \dots, \neg s_j^k)]}_{S_{il}^k}, \quad (9)$$

где S_{ij}^k – реализующее операционное множество; kf – состояние операции; $\left(\bigvee_{l=1}^L\right)$ – связка ИЛИ не исключает возможности выполнения одной и той же операции разным соотношением ресурсов.

Выражение (8) будем называть условием работоспособности операционного процесса или первым условием работоспособности ТЛО.

Приписывая значение «ИСТИНА» соответствующему литералу из множества S_{il}^k , получим, что первое условие работоспособности (9) эквивалентно тавтологичности формулы F [17].

Транспортно-логистический процесс. Транспортно-логистический процесс – определенным образом организованная во

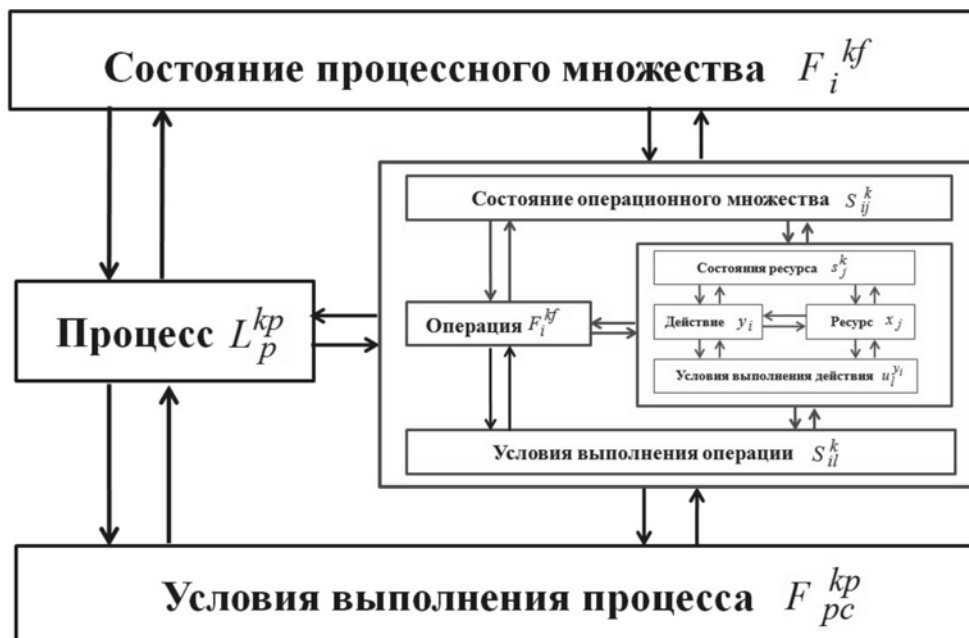


Рис. 5. Процесс формирования ТЛП

времени последовательность выполнения ТЛО, позволяющая достигнуть заданных показателей ТЛС.

Процесс формирования ТЛП представлен на рис. 5.

Пусть для выполнения ТЛП существует и всегда доступен набор необходимых операций F_i^{kf} , определяемых в (7), тогда операционный процесс можно представить формулой L_p^{kp} в ДНФ в виде

$$L_p^{kp} = \bigvee_{c=1}^C \bigwedge_{i=1}^n F_i^{kf}, \quad (10)$$

$$L_p^{kp} = [\underbrace{(F_{i=1}^{kf}, \dots, F_{i=h}^{kf}) \wedge (F_{i=2}^{kf}, \dots)}_{F_{p1}^{kp}}] \vee \dots \vee [\underbrace{(F_{i=1}^{kf}, \dots, F_{i=m}^{kf}) \wedge (F_{i=5}^{kf}, \dots, F_{i=l}^{kf})}_{F_{pc}^{kp}}], \quad (11)$$

где $\left(\bigvee_{c=1}^C \right)$ – логическая связка ИЛИ не исключает возможности выполнения одного и того же процесса разным соотношением операций, а на множестве L_p^{kp} задан полный строгий порядок F_i^{kf} ; kp – состояние ТЛП.

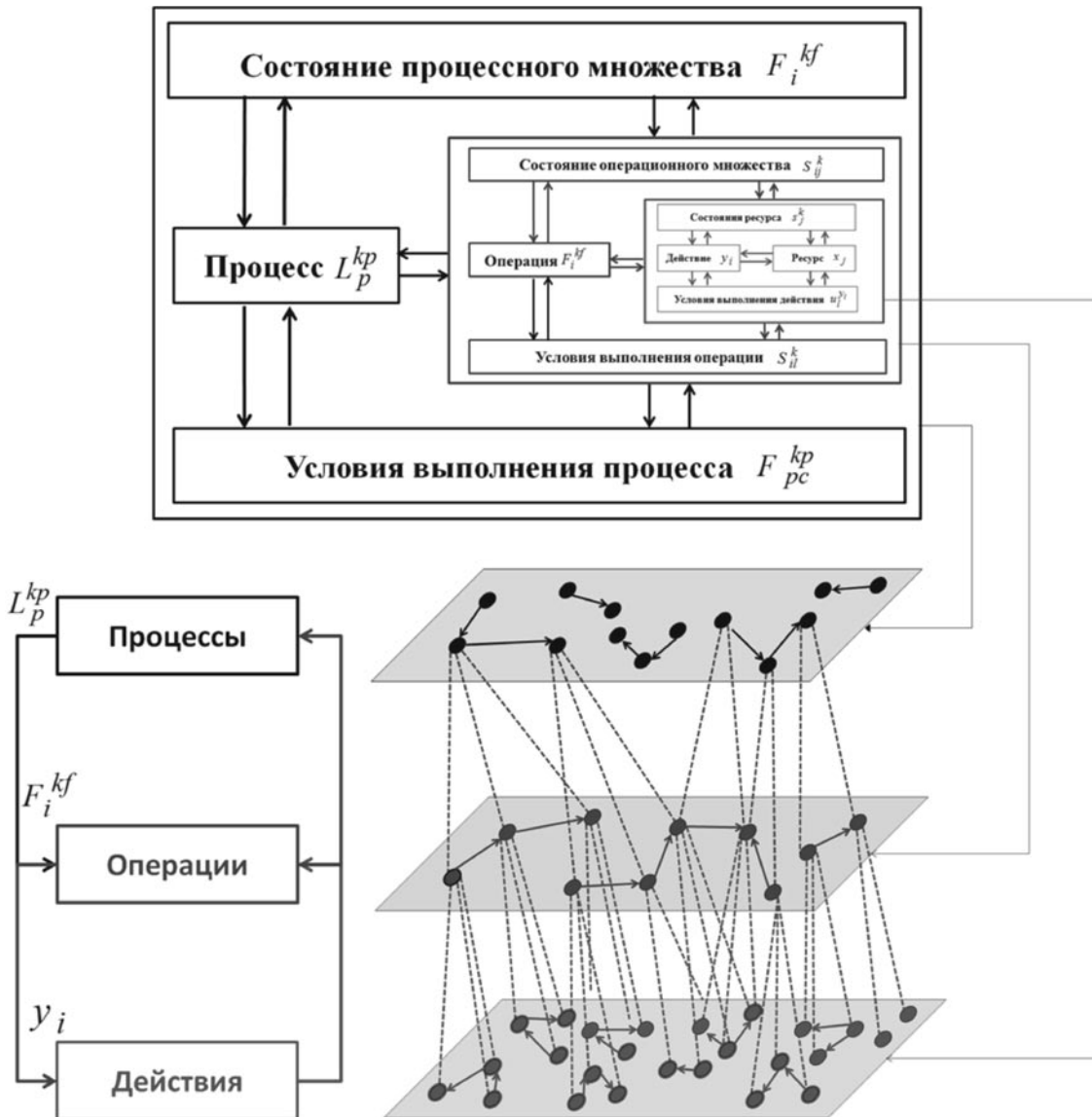


Рис. 6. Концептуальная структура ТЛП

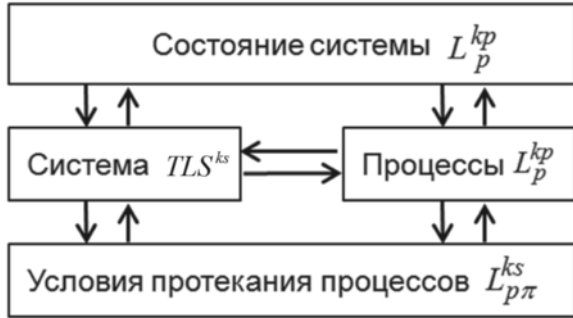


Рис. 7. Устойчивая работа ТЛС

Отношение строгого порядка на L_p^{kp} задает порядок следования операций F_i^{kf} .

Приписывая значения «ИСТИНА» соответствующему литералу из множества F_{pc}^{kp} , получим, что второе условие устойчивой работоспособности ТЛП эквивалентно тавтологичности формулы L_p^{kp} [17].

Схема концептуальной структуры ТЛП представлена на рис. 6.

Организация ТЛП в ТЛС. Под устойчивой работой ТЛС будем понимать определенным образом организованную во времени последовательность протекания ТЛП, направленную на сохранение и повышение устойчивости ТЛС, определяемой ее функцией полезности.

Процесс поддержания устойчивой работы ТЛС представлен на рис. 7.

Пусть для устойчивой работы ТЛС, определяемой функцией полезности $\Phi(\phi_1, \dots, \phi_n)$, существует возможность организации протекания необходимого множества ТЛП L_p^{kp} , определяемых в (10), (11). Тогда устойчивую работу ТЛС можно представить формулой TLS_p^{ks} в ДНФ в виде:

$$TLS^{ks} = \bigvee_{\pi=1}^N \bigwedge_{p=1}^n L_p^{kp} \rightarrow \rightarrow TLS \langle \max \Phi(\phi_1, \dots, \phi_n) \rangle, \quad (12)$$

$$TLS_p^{ks} = [(L_{p=1}^{kp}, \dots, L_{p=h}^{kp}) \wedge (L_{p=2}^{kp}, \dots,)] \vee \dots \vee [(L_{p=1}^{kp}, \dots, L_{p=m}^{kp}) \wedge (L_{p=5}^{kp}, \dots, L_{p=l}^{kp})], \quad (13)$$

где $\left(\bigvee_{\pi=1}^N \right)$ – логическая связка «ИЛИ» не исключает возможности обеспечения устой-

чивой работы ТЛС, разным соотношением протекающих ТЛП.

Приписывая значение «ИСТИНА» соответствующему литералу из множества $L_{p\pi}^{ks}$, получим, что третье условие устойчивой работоспособности ТЛС также эквивалентно тавтологичности формулы TLS_p^{ks} .

Схема концептуальной структуры ТЛС представлена на рис. 8.

Помимо линейной записи, формулы (8)–(13) могут быть представлены балансовым соотношением, не только способствующим встраиванию логистических моделей в модели экономики логистического процесса, но и открывающим путь к решению задачи его самоорганизации. Балансовое соотношение, эквивалентное первому условию работоспособности ТЛС (8), примет вид:

$$F_i^{kf} \sim Z^{F_i^{kf}}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^k \times q_i, \quad (14)$$

где $Z(t)$ – количество ресурсов, требуемое для выполнения логистических операций в момент времени t ; q_i – интенсивность i -й операции.

Опираясь на соотношение (14), можно построить $n \times m$ матрицу A с элементами

$$A_{ij} = \begin{cases} a_{ij}^k, & \text{если } (S_{ij}^k \in u_i^{y_i}) \wedge (S_{ij}^k = s_j^k), \\ -a_{ij}^k, & \text{если } (S_{ij}^k \in u_i^{y_i}) \wedge (S_{ij}^k = \neg s_j^k), \\ 0, & \text{если } S_{ij}^k \cap u_i^{y_i} = \varnothing \end{cases} \quad (15)$$

и записать соотношение (16) в привычной линейной форме

$$Z = A \times q. \quad (16)$$

Эта форма устойчиво разрешима, если соответствующая ей формула F тавтологична. Причем она разрешима при любом изменении матрицы A , сохраняющем схему расположения знаков [17]. Тогда смысл самоорганизации логистического процесса будет заключаться в том, что при заданных значениях количеств ресурсов Z , рекомендуемых для выполнения системы W , интервалов изменения коэффициентов a_{ij}^k и интенсивностей операций q_i отыскиваются такие величины коэффициентов a_{ij}^k , которые удовлетворяли бы балансовому соотношению. В основу же процедуры поиска

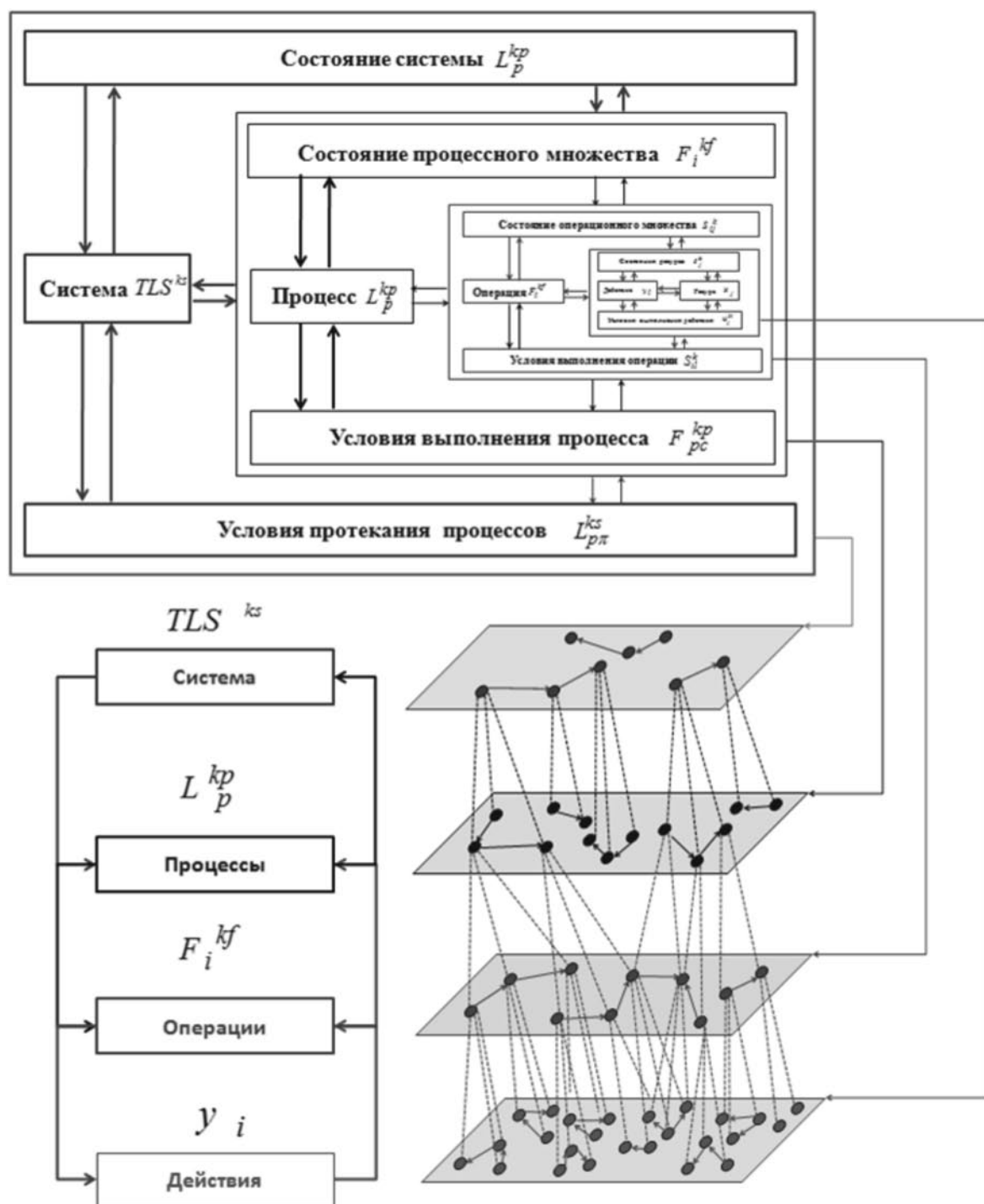


Рис. 8. Концептуальная структура ТЛС

удобно положить метод многомерной последовательной оптимизации, рассмотренный в [9].

Пример. Рассмотрим пример, поясняющий балансовое соотношение (14).

Пусть требуется определить рекомендуемое количество ресурсов, необходимых для доставки на склад груза вида k , за время $t = 4$ ч. Временные ограничения на операцию по доставке груза на склад составляют

$t_1 \leq 1$ ч, а по его укладке $t_2 \leq 3$ ч. Множество ресурсов $\{x_j, j = 1, \dots, 10\}$, множество свойств ресурсов $\{atr_{ij}^k\} = \{\dots, p_{j,j'}^i, \dots\}$ считаются заданными.

Интенсивность выполнения операций по доставке и укладке груза выбираем исходя из временных ограничений, тогда $q_1 = 1, q_2 = 2$. Соотношение (14) запишем в виде:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^k \times q_i = (1_{1,1}^1(x_1) + 1_{1,6}^1(x_6)) \times 1 + (1_{2,4}^3(x_4) + 1_{2,10}^3(x_{10})) \times 3,$$

где x_1 – сидельный тягач с полуприцепом; x_6 – водитель сидельного тягача; x_4 – штабелер; x_{10} – оператор штабелера.

Визуально процесс поиска рекомендуемых ресурсов для выполнения ТЛО, предусмотренных условиями задачи, отражен на рис. 9.

Приведенная интерпретация ТЛП в ТЛС в логико-алгебраическом исчислении хорошо ложится в русло построения экспертных [18] и интеллектуальных систем на транспорте, ранее рассмотренных в [15,16], а возможность представления формул

$F_i^{kf}, L_p^{kp}, TLS^{ks}$ семантическим деревом [19] обеспечивает рациональное использование компьютерной памяти при имитационном моделировании ТЛП в случае погружения этого дерева в управляющую среду.

Примененные в имитационном моделировании поведения реальных логистических систем рассмотренной ресурсно-операционной модели ТЛП дают возможность проигрывать различные варианты их организации с целью выбора наиболее экономичного из них и использовать наработанную ранее в [1] методологию имитационного моделирования применительно к ТП. Для компьютерной интерпретации семантических деревьев могут подойти автоматы с ассоциативной организацией [20, 21].

Поставленные в настоящей статье задачи принципиально решены. В качестве математического аппарата выбрано логико-алгебраическое исчисление, позволившее описать процессы, происходящие как в экспертных системах, так и в системах с управляемой самоорганизацией ТЛП, и перебросить мост в наработанную ранее в

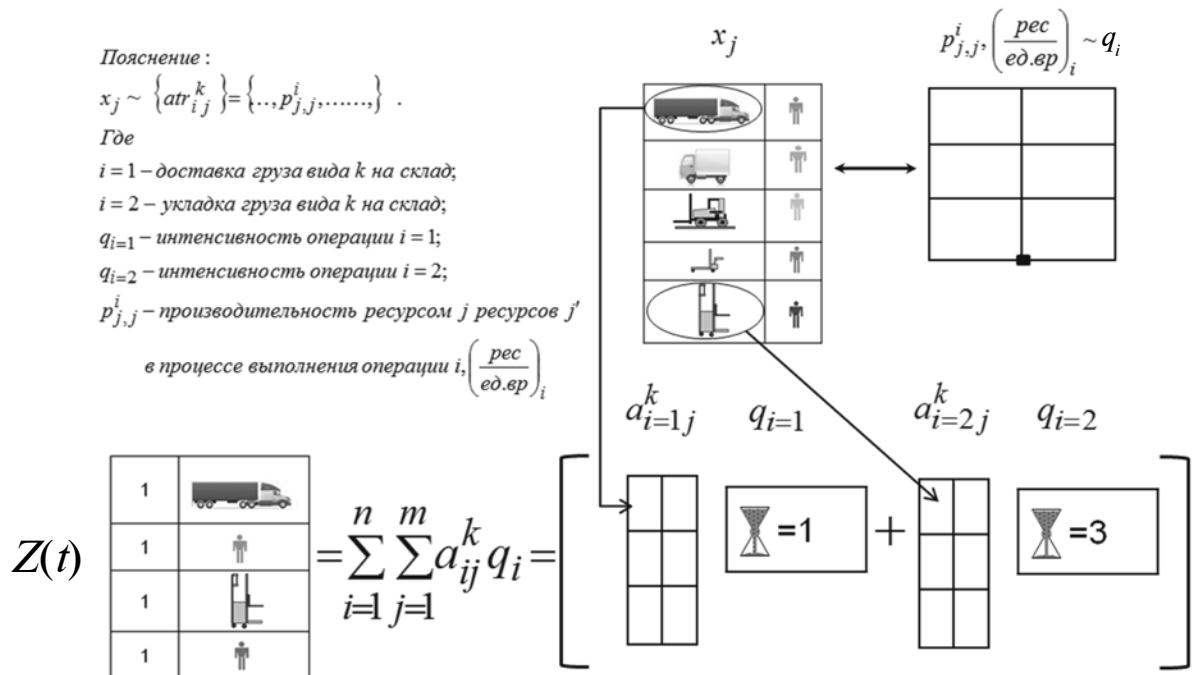


Рис. 9. Процедура поиска ресурсов для выполнения ТЛО

[9] методологию построения самоорганизующихся ТС.

В рамках исчисления предикатов правомерен переход к исчислению нечетких логических переменных в интуиционистских и модальных логиках со сложной семанти-

кой, наиболее адекватно отражающих поведение реальных ТЛП.

Работа проведена при поддержке Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга в 2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белый О.В., Кокаев О.Г., Попов С.А.** Архитектура и методология транспортных систем. Монография. СПб.: «Элмор», 2002. 256 с.
2. **Takyi Harriet, Kofi Poku, Emmanuel Kwaben Anin.** Logistics Inefficiencies of Urban Transportation System in Ghana // *International J. of Humanities and Social Science*. 2013. Vol. 3 No. 6.
3. **Villarreal B., Cortez E., Carrales G., Novelo P., González D.** Improving performance through Logistics Strategies // *International Business & Economics Research J*. 2009. Vol. 8. No. 3.
4. **Селиверстов Я.А.** Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. № 1. С. 43–49.
5. **Linat Özdamar, Ediz Ekinci, Beste Küçükyazıcı.** Emergency Logistics Planning in Natural Disasters // *Annals of Operations Research*. Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands, 2004. No. 129. Pp. 217–245.
6. **Фахми Ш.С., Цыцулин А.К.** Видео-системы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеoinформации // *Датчики и системы*. 2011. № 4. С. 58–62.
7. **Селиверстов С.А., Кокаев О.Г., Лукомская О.Ю.** О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования // *Транспорт Российской Федерации*. 2012. № 2(39). С. 30–34.
8. **Davydenko I.Y., Lorant A. Tavasszy, Hans Quak.** A quantitative model for exploration of logistics sprawl of the future // *5-th International Urban Freight Conference METRANS*. Long Beach, 2013
9. **Кокаев О.Г., Лукомская О.Ю.** Самоорганизация транспортных процессов: модели и приложения // *Транспорт Российской Федерации*. 2009. № 1(20). С. 40.
10. **Giarratano J.C., Riley G.D.** Expert Systems: Principles and Programming // *Course Technology*. Boston, 2004. 856 p.
11. **Таранцев А.А.** Случайные величины и работа с ними: учебно-метод. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ИД «Петрополис», 2011. 160 с.
12. **Кузин Л.Т.** Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов // *Основы кибернетики*. В 2 т. Т. 1. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1994. 576 с.
13. **Вельдер С.Э., Лукин М.А., Шалыто А.А., Яминов Б.Р.** Верификация автоматных программ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 242 с.
14. **Richard W. Kaye.** The Mathematics of Logic. Cambridge University Press, 2007. 204 p.
15. **Лукинский В.С. [и др.].** Модели и методы теории логистики: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2003. 219 с.
16. **Гусев С.А.** Интеллектуализация логистики. Саратов: Изд-во СГТУ, 2013. 204 с.
17. **Davydov G, Davydova I.** Tautologies and positive solvability of homogeneous systems. // *Annals of Pure and Applied Logic*. 1992. Vol. 57. No. 1.
18. **Селиверстов Я.А.** Использование правил резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2013. № 1 (20). С. 145–152.
19. **Russell S., Norvig P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, 2003. 1018 p.
20. **Hui Yu, Furaos Shen, Osamu Hasegawa.** A Multidirectional Associative Memory Based on Self-organizing Incremental Neural Network // *Neural Information Processing. Models and Applications Lecture Notes in Computer Science*. 2010. Vol. 6444. Pp 344–351.
21. **Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.** Интеллектуальная обучающая система концептуальному проектированию автоматизированных систем // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2010. № 4(2). Т. 12. С. 465–468.



REFERENCES

1. Belyy O.V., Kokayev O.G., Popov S.A. *Arkhitektura i metodologiya transportnykh sistem*. St. Petersburg: Elmor Publ., 2002, 256 p. (rus)
2. Takyi Harriet, Kofi Poku, Emmanuel Kwaben Anin. Logistics Inefficiencies of Urban Transportation System in Ghana, *International Journal of Humanities and Social Science*, 2013, Vol. 3, No. 6.
3. Villarreal B., Cortez E., Carrales G., Novelo P., González D. Improving performance through Logistics Strategies, *International Business & Economics Research Journal*, 2009, Vol. 8, No. 3.
4. Seliverstov Ya.A. Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh, *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)
5. Linet Özdamar, Ediz Ekinci, Beste Küçükyazici. Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. *Annals of Operations Research*, Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands, 2004, No. 129, Pp. 217–245.
6. Fakhmi Sh.S., Tsytulin A.K. Videosistemy na kristalle: novyye arkhitekturnyye resheniya v zadachakh obrabotki videoinformatsii, *Datchiki i sistemy*, 2011, No. 4. Pp.58–62. (rus)
7. Seliverstov S.A., Kokayev O.G., Lukomskaya O.Yu. O tekhnologii analiza transportnykh protsessov v sovremennykh usloviyakh khozyaystvovaniya, *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2012, No. 2(39), Pp. 30–34. (rus)
8. Davydenko I.Y., Tavasszy L.A., Quak H. A quantitative model for exploration of logistics sprawl of the future, *5-th International Urban Freight Conference METRANS Proc.*, Long Beach, 2013.
9. Kokayev O.G., Lukomskaya O.Yu. Samoorganizatsiya transportnykh protsessov: modeli i prilozheniya, *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2009, No. 1(20), 40 p. (rus)
10. Giarratano J.C., Riley G.D. Expert Systems: Principles and Programming, *Course Technology*, Boston, 2004, 856 p.
11. Tarantsev A.A. *Sluchaynyye velichiny i rabota s nimi*, St. Petersburg, Petropolis Publ., 2011, 160 p. (rus)
12. Kuzin L.T. Matematicheskiye osnovy kibernetiki, *Osnovy kibernetiki*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1994, Vol. 1, 576 p. (rus)
13. Velder S.E., Lukin M.A., Shalyto A.A., Yaminov B.R. *Verifikatsiya avtomatnykh programm*, St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2011, 242 p. (rus)
14. Richard W. Kaye. *The Mathematics of Logic*, Cambridge University Press, 2007, 204 p.
15. Lukinskiy V.S. i dr. Modeli i metody teorii logistiki. St. Petersburg: Piter Publ., 2003, 219 p. (rus)
16. Gusev S.A. *Intellektualizatsiya logistiki*. Saratov: SGTU Publ., 2013, 204 p. (rus)
17. Davydov G., Davydova I. Tautologies and positive solvability of homogeneous systems, *Annals of Pure and Applied Logic*, 1992, Vol. 57, No. 1.
18. Seliverstov Ya.A. Ispolzovaniye pravila rezolyutsiy v voprosno-otvetnoy protsedure transportnogo planirovshchika, *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2013, No. 1(20), Pp. 145–152. (rus)
19. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 2003. 1018 p.
20. Hui Yu, Furaio Shen, Osamu Hasegawa. A Multidirectional Associative Memory Based on Self-organizing Incremental Neural Network, *Neural Information Processing. Models and Applications Lecture Notes in Computer Science*, 2010, Vol. 6444, Pp. 344–351.
21. Afanasyev A.N., Voyt N.N. Intellektualnaya obuchayushchaya sistema kontseptualnomu proyektirovaniyu avtomatizirovannykh sistem, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, No. 4 (2), Vol. 12, Pp. 465–468. (rus)

СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович — научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д. 13.

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

SELIVERSTOV, Yaroslav A. *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences*.

199178, 12th line 13, of Vasilievsky Island, St. Petersburg, Russia.

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович — научный сотрудник *Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко*.

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13.

E-mail: amuanator@rambler.ru

SELIVERSTOV, Svyatoslav S. *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences*.

199178, 12-th line of Vasilievsky Island 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: amuanator@rambler.ru



УДК 681.3.06

И.Г. Черноруцкий

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЖЕСТКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

I.G. Chernorutskiy

SEQUENCE RELAXATION METHODS FOR STIFF OPTIMIZATION PROBLEMS

Предложены методы покоординатного спуска (Гаусса–Зейделя) со специальным выбором системы координат, согласованной с собственными векторами локальных матриц Гессе минимизируемого функционала. В отличие от классических покоординатных процедур, построенные методы сохраняют сходимость и эффективность в условиях высокой степени жесткости целевых функционалов.

МЕТОДЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ; НЕВЫПУКЛЫЕ ЗАДАЧИ; ЖЕСТКИЕ ФУНКЦИОНАЛЫ.

New sequence relaxation methods are discussed. In contrast to the classical relaxation procedures, the methods retain the convergence and efficiency for non-convex nonlinear programming problems under conditions of high stiffness of target functionals.

SEQUENCE RELAXATION METHODS; NON-CONVEX OPTIMIZATION PROBLEMS; STIFF FUNCTIONALS.

Решается задача безусловной минимизации вида

$$J(x) \rightarrow \min_x, \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n, \\ J \in C^2(R^n)$$

с жестким в смысле определения [1] целевым функционалом. Основные проблемы, связанные с минимизацией жестких функционалов, изложены в [1–8].

Для построения минимизирующей последовательности $\{x^i\}, \lim_{i \rightarrow \infty} J(x^i) \in \text{Arg min}_x J(x)$ рассматривается класс методов последовательной релаксации с использованием различных систем координат и реализацией на каждом шаге спуска вдоль очередного координатного орта.

Например, в соответствии с классическим методом циклического покоординатного спуска Гаусса–Зейделя (ЦПС), использующим естественную систему координат, переход от вектора x^i к вектору x^{i+1} происходит следующим образом: для $l \in [1: n]$ компонент x_l^{i+1} вектора x^{i+1} определяется как

$$x_l^{i+1} \in \text{Arg min}_{x \in R^1} J(x_1^{i+1}, x_2^{i+1}, \dots,$$

$$x_{l-1}^{i+1}, x, x_{l+1}^i, \dots, x_n^i).$$

В общем случае при использовании системы координат $u^1, u^2, \dots, u^n$ вектор x^{i+1} получается из вектора x^i следующим образом:

$$x^{i,l} \in \text{Arg min}_{h \in R^1} J(x^{i,l-1} + hu^l), \quad l = 1, \dots, n; \\ x^{i,0} = x^i, \quad x^{i,n} = x^{i+1}.$$

Принципиальная схема рассматриваемого далее класса методов последовательной релаксации — *обобщенного покоординатного спуска* (ОПС) основана на процедуре диагонализации локальной матрицы Гессе $J''(x)$ на каждом шаге итерационного процесса с последующим циклическим покоординатным спуском вдоль собственных векторов. Целесообразность такого подхода вытекает из геометрически очевидного факта, заключающегося в том, что оси наиболее рациональной системы координат при минимизации квадратичных функционалов (независимо от их выпуклости) методом покоординатного спуска, совпадают с собственными векторами матрицы вторых производных, являющихся осями симметрии

соответствующих поверхностей уровня. Эта идея неоднократно высказывалась в литературе и даже строились соответствующие алгоритмы. Однако численные эксперименты показывали низкую эффективность такого подхода. Существует и объяснение этих неудовлетворительных результатов. Оно основано на том, что при определении собственных векторов, соответствующих близким или кратным собственным значениям, возникают принципиальные вычислительные трудности. Аналогичные трудности, связанные с ограниченной точностью задания исходной информации, а также последующих вычислений, наблюдаются и при диагонализации плохо обусловленных матриц, имеющих относительно малые по модулю спектральные составляющие. Указанные обстоятельства, вероятно, явились основным сдерживающим фактором, не позволившем внедрить обсуждаемые ниже методы в вычислительную практику. Однако неудачи при численном экспериментировании были вызваны, по-видимому, особенностями реализации метода, рассчитанной на случай выпуклых функционалов.

Как показано ниже, для целей оптимизации как в выпуклой ситуации, так и в невыпуклой, достаточно вычислить произвольный ортонормированный базис в инвариантном подпространстве, отвечающем каждой изолированной группе собственных значений. При этом собственные векторы могут быть вычислены со значительными погрешностями, что не снижает эффективность процесса минимизации. А вот отвечающие этим базисам линейные оболочки определяются с высокой точностью и совпадают с истинными подпространствами, определяемыми невозмущенной диагонализируемой матрицей. Как раз это обстоятельство является принципиальным и, как показано ниже, приводит к локальной декомпозиции плохо обусловленной задачи на несколько относительно хорошо обусловленных задач меньшей размерности.

Этот вывод в известной степени подтверждается следующей теоремой.

Теорема 1. Пусть A – симметричная матрица $n \times n$; $\{u^i\}$ – ортонормированные собственные векторы; λ_i – собственные значения.

Тогда при $\lambda_i \neq \lambda_j$ с точностью до величин второго порядка малости имеем

$$\langle u^i + du^i, u^j \rangle = (\lambda_i - \lambda_j)^{-1} \langle (dA)u^i, u^j \rangle, \quad (1)$$

где dA – возмущение матрицы A , du^i – соответствующее возмущение вектора u^i .

Доказательство. Отбрасывая величины второго порядка малости, из равенства $Au^i = \lambda_i u^i$ получим:

$$(dA)u^i + Adu^i = \lambda_i du^i + d\lambda_i u^i.$$

Отсюда, умножая обе части равенства скалярно на u^j , имеем

$$\begin{aligned} \langle (dA)u^i, u^j \rangle + \langle Adu^i, u^j \rangle &= \\ &= \langle \lambda_i du^i, u^j \rangle + \langle d\lambda_i u^i, u^j \rangle. \end{aligned}$$

В силу равенств $\langle u^i, u^j \rangle = 0$, $\langle Adu^i, u^j \rangle = \lambda_j \langle du^i, u^j \rangle$ имеем

$$(\lambda_i - \lambda_j) \langle du^i, u^j \rangle = \langle (dA)u^i, u^j \rangle,$$

откуда следует (1). Теорема доказана.

Пусть теперь

$$M_1 = \sum_{i=1}^{n-r} \alpha_i u^i, \quad M_2 = \sum_{j=n-r+1}^n \alpha_j u^j$$

есть два линейных многообразия, порожденных непересекающимися системами собственных векторов $\{u^i, i \in [1: n-r]\}$, $\{u^j, j \in [n-r+1: n]\}$ матрицы A . Если соответствующие множества собственных значений $\{\lambda_i, i \in [1: n-r]\}$, $\{\lambda_j, j \in [n-r+1: n]\}$ строго разделены в смысле $|\lambda_i| \gg |\lambda_j|$, то из (1) следует $\langle u^i + du^i, u^j \rangle \cong 0$ при достаточно малой величине $\|dA\|/|\lambda_i|$. Это означает, что все собственные векторы под действием возмущения dA изменяются только в пределах своих линейных многообразий, сохраняя с высокой точностью свойство ортогональности к векторам из дополнительных многообразий. При этом сами вариации векторов при близких $\lambda_i \cong \lambda_j$ собственных значениях в пределах фиксированного линейного многообразия, как это следует из (1), могут быть весьма значительными.

Изложенное выше позволяет в качестве модели программ, реализующих различные методы диагонализации матрицы A , использовать оператор $\Lambda(A)$, ставящий в соответствие произвольной симметричной матрице A ортогональную матрицу V , отличную, вообще говоря, от истинной матрицы U , состоящей из собственных векто-

ров матрицы A . Оператор Λ характеризуется тем, что если спектр матрицы A разделяется на p групп

$$\lambda'_i(A), i \in [1 : k_t], \sum_{t=1}^p k_t = n$$

«близких» между собой собственных чисел, то каждой группе соответствует набор столбцов $\{v_{it}\}$ матрицы V , задающий точное линейное многообразие, порожденное соответствующими столбцами $\{u^i\}$ точной матрицы U .

Рассмотрим квадратичную аппроксимацию

$$f(x) = 1/2 \langle Ax, x \rangle - \langle b, x \rangle + c \quad (2)$$

исходного функционала $J(x)$ в окрестности точки x . Допустим, что известна матрица A и ортогональная матрица U , приводящая ее к диагональному виду $U^T A U = \text{diag} \lambda_i$. Тогда замена переменных $x = Uy$ приводит квадратичный функционал к сепарабельному виду:

$$f(x) = f(Uy) = \sum_{i=1}^n f_i(y_i), \quad (3)$$

где f_i – квадратичные функции одной переменной (параболы).

Таким образом, достигается *полная локальная декомпозиция* исходной задачи, и последняя сводится к n независимым экстремальным задачам. В результате поиск оптимального вектора u^* может осуществляться покомпонентно, ибо связь между аргументами y_i фактически исчезает. В указанной идеализированной ситуации явление заклинивания метода покоординатного спуска невозможно, и все вычислительные проблемы при применении покоординатных стратегий поиска оптимума, связанные с большими значениями n , формально снимаются.

В действительности бывает задана не матрица A , а возмущенная матрица $A + dA$, где dA отражает как неопределенность задания исходной матрицы A , так и последующие ошибки округления при проведении собственно процесса диагонализации. В связи с этим вместо точной матрицы U оказывается доступной некоторая матрица $V = \Lambda(A)$. Свойства оператора Λ были рас-

смотрены выше. Замена переменных $x = Uy$ уже не приводит к представлению (3). Для изучения создавшейся ситуации важное значение имеет следующая теорема.

Теорема 2. Пусть собственные значения $\{\lambda_i\}$ и отвечающие им ортонормированные собственные векторы $\{u_i\}$, $i \in [1 : n]$, некоторой симметричной матрицы A разделены произвольным образом на p групп

$\lambda'_i, u^{it}, i \in [1 : k_t], t \in [1 : p], \sum_{t=1}^p k_t = n$ так, что $u^{it} \neq u^{j'}$, $t' \neq t''$, $i \in [1 : k_{t'}], j' \in [1 : k_{t''}]$, где λ'_j, u^{jt} означают j -е собственное число и соответствующий собственный вектор группы t . Тогда, если в каждом линейном многообразии M_t размерности k_t с базисом $\{u^{it}\}$, $i \in [1 : k_t]$ задать иной ортонормированный базис $\{w^{it}\}$, $i \in [1 : k_t]$, связанный с исходным базисом линейным соотношением

$$w^{it} = \sum_{m=1}^{k_t} \alpha'_{mi} u^{mt}, i \in [1 : k_t], \alpha'_{mi} \in R^1,$$

то существует такая матрица P перестановок столбцов, что

1. преобразование подобия

$$\overline{W}^T A \overline{W}, W = \{w^{11}, \dots, w^{k_1 1}, \dots, w^{k_p p}\}, \overline{W} = WP$$

приводит матрицу A к блочно-диагональному виду

$$\overline{W}^T A \overline{W} = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_p), \overline{W}^T = \overline{W}^{-1}$$

с квадратными $(k_t \times k_t)$ матрицами A_t на главной диагонали;

2. собственные значения матрицы A_t есть

$$\lambda'_i, i \in [1 : k_t], t \in [1 : p].$$

Доказательство. Первое утверждение проверяется непосредственно с учетом ортонормированности векторов базиса $\{u^i\}$. Для доказательства второго утверждения достаточно заметить, что вид и расположение матрицы A_m при фиксированном многообразии M_m не зависят от способа задания остальных многообразий M_t , $t \neq m$. Поэтому, предположив, что все $k_t = 1$ при $t \neq m$, получим, что все оставшиеся многообразия будут содержать по одному собственному вектору и собственному числу. Тогда будем иметь:

$$\overline{W}^T A \overline{W} = \text{diag}(\lambda_1^1, \lambda_1^2, \dots, A_m, \dots, \lambda_1^p).$$

Учитывая, что преобразование подобия не изменяет спектр матрицы, приходим к требуемому заключению. Теорема доказана.

Теорема 3. Пусть $V = \Lambda(A)$, тогда

1. замена переменных $x = Vy$ с точностью до нумерации компонентов вектора y приводит функционал (2) к блочно-сепарабельному виду

$$f(x) = f(Vy) = f_s(y) = \sum_{i=1}^p f_i(y^i), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} y &= (y_1, \dots, y_n) = (y^1, \dots, y^p), \\ y^i &= (y_1^i, \dots, y_{k_i}^i), \\ f_i(y^i) &\triangleq \frac{1}{2} \langle A_i y^i, y^i \rangle - \langle b^i, y^i \rangle + c_i, \quad c_i \in R^1; \end{aligned}$$

2. собственные значения матрицы ff' равны

$$\lambda_i^t(A), \quad i \in [1 : k_i], t \in [1 : p].$$

Доказательство. Имеем $V = \overline{W}P$, где P – некоторая матрица перестановок столбцов. Поэтому

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2} \langle V^T A Vy, y \rangle - \langle V^T b, y \rangle + c = \\ &= \frac{1}{2} \langle P^T \overline{W}^T A \overline{W} Py, y \rangle - \langle P^T \overline{W}^T b, y \rangle + c = \\ &= \frac{1}{2} \langle \overline{W}^T A \overline{W} z, z \rangle - \langle \overline{W}^T b, z \rangle + c, \quad z \triangleq Py. \end{aligned}$$

Согласно теореме 2, матрица $\overline{W}^T A \overline{W}$ имеет блочно-диагональную структуру, что и доказывает первое утверждение. Второе утверждение есть прямое следствие второго утверждения теоремы 2.

Следствие. Пусть собственные числа матрицы A удовлетворяют неравенствам $\lambda_1 \geq \lambda_{n-r} \gg |\lambda_{n-r+1}| \geq \dots \geq |\lambda_n|$; тогда

1. замена переменных $x = Vy$, $V = \Lambda(A)$, где $V = (v^{11}, \dots, v^{1n-r}, v^{21}, \dots, v^{2r})^T$,

$$v^{1i} = \sum_{m=1}^{n-r} \alpha_{mi}^1 u^m; \quad v^{2i} = \sum_{m=1}^r \alpha_{mi}^2 u^{n-r+m}$$

с точностью до нумерации компонентов вектора y приводит $f(x)$ к виду

$$f_s(y) = f_1(y^1) + f_2(y^2), \quad y = (y^1, y^2), \quad (5)$$

где $y^1 = (y_1, \dots, y_{n-r})$, $y^2 = (y_{n-r+1}, \dots, y_n)$;

2. $\eta_1 \ll \eta$, $\eta_2 \ll \eta$, где η_i – показатели жесткости задач $f_i \rightarrow \min$, $i = 1, 2$.

Таким образом, исходная оптимизационная задача локально может быть сведена к двум эквивалентным задачам с существенно меньшими числами η_i . Представление (5) реализует принцип *частичной локальной декомпозиции* и является аналогом идеализированного соотношения (3).

Если собственные числа матрицы квадратичного функционала разделяются более, чем на две группы, то будет справедливо представление (5), содержащее соответствующее число слагаемых.

Согласно (5) появляется возможность независимого решения не связанных между собой оптимизационных задач для функционалов f_i с невысокими показателями жесткости.

Полученные результаты носят локальный характер и справедливы в рамках квадратичной аппроксимации исходного функционала $J(x)$. Для неквадратичных функционалов приближенное выполнение соотношений типа (5) позволяет говорить о существенном ослаблении связей между различными группами переменных, что определяет достаточно высокую эффективность обобщенного покоординатного спуска и в общем случае.

Исследование сходимости методов ОПС в предположении точной линейной оптимизации вдоль направляющих ортов может быть основано на общем подходе к исследованию алгоритмов нелинейного программирования [9]. Пусть решается задача $J(x) \rightarrow \min$, $x \in R^n$, $J(x) \in C^1(R^n)$. Рассмотрим произвольный алгоритм, строящий последовательность точек $\{x^k\}$, причем каждая точка x^{k+1} получается из x^k последовательной минимизацией функционала $J(x)$ вдоль направлений $d^1, \dots, d^n$, начиная из точки x^k . Предполагается, что матрица $D = (d^1, \dots, d^n)$ может зависеть от номера k , являясь при любом k ортогональной.

Легко видеть, что метод ЦПС, метод Розенброка, а также методы ОПС описываются приведенной общей схемой. Можно доказать, что все эти методы при некоторых естественных ограничениях сходятся, т. к. сходится базовый алгоритм.

Лемма 1. Пусть $J(x) \in C^1(R^n)$ и пусть задана последовательность точек $\{x^k, k = 1, 2, \dots\}$ из R^n такая, что

1. $\forall k J(x^{k+1}) \leq J(x^k)$;
2. $J(x^k) \rightarrow J, k \in K$,

где K — некоторое бесконечное подмножество индексов.

$$\text{Тогда } \lim_{k \rightarrow \infty} J(x^k) = \lim_{k \in K} J(x^k) = J.$$

Доказательство содержится в [10]. В лемме утверждается, что если последовательность значений функционала $\{J_k\}$ является монотонно невозрастающей и ее подпоследовательность $\{J_k, k \in K\}$ сходится к некоторому значению J , то вся последовательность $\{J_k\}$, сходится к этому же значению.

Теорема 4. Пусть

1. $J(x) \in C^1(R^n)$;
2. множество решений, определяемое как $X^* = \{x \in R^n \mid J'(x) = 0\}$ непусто;
3. множество $\Theta = \{x \in R^n \mid J(x) \leq J(x^0)\}$, где x^0 — заданная начальная точка, ограничено и замкнуто (компактно) в R^n ;
4. минимум функционала J вдоль любой прямой в R^n единственен;
5. если $J'(x^k) = 0$, то алгоритм останавливается в x^k .

Тогда каждая предельная точка последовательности $\{x^k\}$, построенной базовым алгоритмом, принадлежит множеству X^* .

Доказательство. Если последовательность $\{x^k\}$ конечна, то это значит, что алгоритм остановился в точке $x^k \in X^*$, и утверждение теоремы очевидно. Допустим поэтому, что алгоритм порождает бесконечную последовательность точек $\{x^k\}$. Согласно третьему предположению все точки расположены в компактном множестве Θ и, следовательно, должна существовать подпоследовательность $\{x^k, k \in K\}$, сходящаяся при $k \rightarrow \infty$ к некоторой точке x . Покажем, что $x \in X^*$, то есть $J'(x) = 0$.

Рассмотрим подпоследовательность $\{x^{k+1}, k \in K\}$. Она также содержится в Θ , и поэтому существует $K' \subset K$ такое, что $x^{k+1} \rightarrow x'$ при $k \in K'$, где x' — некоторая точка из Θ . Из сходимости последовательностей $\{x^k, k \in K\}$, $\{x^{k+1}, k \in K'\}$ следует в силу непрерывности J сходимость последовательностей $\{J(x^k), k \in K\}$, $\{J(x^{k+1}), k \in K'\}$, соот-

ветственно, к значениям $J(x)$, $J(x')$. В силу леммы 4.1 вся последовательность $\{J(x^k)\}$ также оказывается сходящейся к некоторой величине $\tilde{J}$ и при этом $J(x) = J(x') = \tilde{J}$.

Ниже будет показано, что точка x' получается из x последовательной минимизацией вдоль некоторых ортогональных направлений $q^1, \dots, q^n$. Поэтому в силу четвертого предположения из равенства $J(x) = J(x')$ следует $x = x'$. Это значит, что убывания J нет ни в одном из направлений q^i , то есть проекции вектора градиента $J'(x)$ на $q^i, i \in [1: n]$ равны нулю. Отсюда следует, что $J'(x) = 0$.

Для завершения доказательства покажем, что существуют такие ортогональные направления $q^1, \dots, q^n$, которые позволяют получить точку x' из x с помощью последовательной минимизации по этим направлениям.

Пусть D_k — матрица порядка $n \times n$, столбцами которой являются построенные на k -й итерации направления спуска $\{d^{ik}, i \in [1: n]\}$; то есть $x^{k+1} = x^k + D_k \lambda^k$, где $\lambda^k = (\lambda_{k1}, \dots, \lambda_{kn})^T$ — вектор значений шагов вдоль направлений $d^{1k}, \dots, d^{nk}$, соответственно.

Обозначая $y^{1k} = x^k$, $y^{j+1, k} = y^{jk} + \lambda_{kj} d^{jk}$, $j \in [1: n]$, получим, что $x^{k+1} = y^{n+1, k}$ и

$$J(y^{j+1, k}) \leq J(y^{jk} + \tilde{\lambda} d^{jk}), \tilde{\lambda} \in R^1, j \in [1: n]. \quad (6)$$

Рассмотрим последовательность матриц $\{D_k\}$, $k \in K'$. Из этой последовательности можно выделить подпоследовательность, для которой первый столбец d^{1k} будет сходиться к некоторому вектору q^1 . Это следует из того, что множество векторов, норма которых равна единице, компактно. Из этой подпоследовательности можно снова извлечь подпоследовательность, для которой не только $d^{1k} \rightarrow q^1$, но и $d^{2k} \rightarrow q^2$ и т. д. В итоге существует такое $K'' \subset K'$, что $D_k \rightarrow Q$. Причем $\det Q = 1 \neq 0$, так как для всех k $\det D_k = 1$. Имеем, таким образом,

$$x^k \rightarrow x, x^{k+1} \rightarrow x', D_k \rightarrow Q, k \in K''. \quad (7)$$

Поэтому из соотношения $x^{k+1} = x^k + D_k \lambda^k$ имеем

$$\lambda^k \rightarrow \lambda = Q^{-1}(x' - x). \quad (8)$$

Следовательно, $x' = x + Q\lambda$. Пусть $y_1 = x$

и $y^{j+1} = y^j + \lambda_j d^j$. Чтобы доказать, что вектор x' может быть получен из x последовательной минимизацией J по направлениям q^j , $i \in [1: n]$, достаточно показать, что

$$J(y^{j+1}) \leq J(y^j + \tilde{\lambda} q^j), \tilde{\lambda} \in R^1, j \in [1: n]. \quad (9)$$

Из (7), (8) следует, что $y^k \rightarrow y^j$, $j \in [1: n + 1]$ при $k \in K^n$. Поэтому в силу непрерывности J неравенство (9) следует из (6). Теорема доказана полностью.

Сделаем несколько замечаний общего характера. Вопросам выяснения условий сходимости алгоритмов оптимизации уделяется большое внимание. При этом исследуется сходимость последовательности $\{x^k\}$, генерируемой алгоритмом, к некоторому фиксированному множеству X^* , которое называется множеством решений. Наиболее естественный подход к введению понятия множества решений заключается в определении $X^* = \{x^* \in D \subset R^n \mid J(x^*) \leq J(x), x \in D\}$, где D — множество допустимых точек из R^n . Иначе говоря, x^* — решение, если это точка глобального минимума. Однако в действительности такой подход не всегда возможен, и мы вынуждены останавливать процесс при выполнении более слабых предположений относительно полученных алгоритмом точек. Чаше всего для описания множества X^* применяются необходимые условия экстремума, и тогда полагают: $X^* = \{x^* \in D \subset R^n \mid J'(x^*) = 0\}$. Возможны и другие способы задания X^* , которые столь же легко позволяют проверить принадлежность точки x^k множеству решений. Типичное для приложений множество решений может быть задано следующим образом:

$$X^* = \{x^* \in D \subset R^n \mid J(x^*) \leq \tilde{J}\},$$

где $\tilde{J}$ — некоторое приемлемое значение минимизируемого функционала. Очевидно, что сходящийся для фиксированного X^* алгоритм может оказаться несходящимся, если определить множество решений другим способом.

Сходимость алгоритма при заданном X^* является чрезвычайно желательным свойством. Однако полезность этого свойства часто переоценивается. Дело в том, что, исследуя бесконечные последовательности генерируемых алгоритмом точек, мы

фактически обращаемся к некоторым математическим фикциям. В действительности всегда имеют дело с конечной последовательностью и свойство сходимости алгоритма в общем случае не является ни необходимым, ни достаточным для окончательной оценки алгоритма.

Другим фактором, несколько снижающим ценность понятия сходимости, являются различные погрешности, которые всегда присутствуют в реальных вычислениях и почти никогда не фигурируют в доказательствах теорем о сходимости. Вместе с тем известны многочисленные примеры, когда влияние погрешностей оказывается решающим.

Реализация методов обобщенного покоординатного спуска

При реализации методов ОПС в первую очередь необходимо учитывать три фактора, связанных с нормализацией и масштабированием основных переменных задачи, построением аппроксимации матрицы $G(x)$, а также с выбором метода диагонализации матрицы $G(x)$.

Цель *нормализации* состоит в улучшении обусловленности задачи, а также в согласовании масштабов основных переменных, часто имеющих различный, физический смысл и измеряемых в различных единицах.

Масштабирование может выполняться на двух уровнях: на уровне пользователя и на уровне стандартных программных модулей, реализующих конкретный алгоритм параметрической оптимизации. Как показывает опыт решения реальных задач, эффективность процедуры масштабирования существенно зависит от конкретной структуры решаемой задачи. Поэтому, как правило, целесообразно выполнять масштабирование на уровне пользователя, несмотря на известное усложнение процесса подготовки задачи к ее компьютерной реализации. Наиболее часто переход от исходных переменных $x = (x_1, \dots, x_n)$ к новым $y = (y_1, \dots, y_n)$ осуществляется с помощью замены вида

$$x = Dy, D = \text{diag}(d). \quad (10)$$

Диагональная матрица масштабов D

хранится в соответствующей «общей» области подпрограммы, вычисляющей значения $J(x)$, и модифицируется в начале каждого нового цикла оптимизации исходя из равенства

$$d_i = \min\{\delta_2, \max\{|\tilde{x}_i|, \delta_1\}\}, \delta_i > 0, \quad (11)$$

где $\tilde{x}_i$ — лучшее значение i -й переменной, полученное к началу следующего цикла; $\delta_1 \cong \varepsilon_M$ — заданное пороговое значение, исключающее появление нулевых d_i ; $\delta_2 \cong \varepsilon_M^{-1}$. В методах второго порядка, рассматриваемых в данной статье, считается, что новый цикл начинается с процедуры вычисления аппроксимации матрицы вторых производных $G(x)$. Начальное масштабирование проводится на основе заданных начальных значений x_i^0 . В ряде случаев лучшие результаты дает комбинированный метод, использующий дополнительное масштабирование на основе принципа «равного влияния», согласно которому диагональная матрица масштабов D выбирается из условия балансирования производных:

$$d_i = k\gamma_i, \gamma_i = \left(\left| \frac{\partial J}{\partial x_i} \right| + \varepsilon_M \right)^{-1} + \varepsilon_M, \quad (12)$$

где, например, $k = 1$. В этом случае (при отсутствии влияния ε_M) будем иметь

$$\frac{\partial J(Dy)}{\partial y} = \frac{D \partial J}{\partial x} = (1, \dots, 1)^T.$$

При реализации масштабов (12) в начале каждого цикла оптимизации необходимо проводить анализ чувствительности для получения грубой аппроксимации вектора $\partial J / \partial x$ в окрестности точки $\tilde{x}$.

Двух указанных методов нормализации управляемых параметров, обычно применяемых совместно, бывает достаточно для решения большинства практических задач методами параметрической оптимизации.

Обратимся к нормализации значений минимизируемого функционала. Теоретически масштаб значений целевого функционала $J(x)$ не оказывает влияния на процесс поиска. Однако при численной реализации алгоритма выбор масштаба $J(x)$ является

существенным фактором. Как показывает практика, целесообразно поддерживать значения $J(x)$ на уровне $J(x) \cong 1$ с целью уменьшения вычислительных погрешностей и предотвращения влияния концов диапазона чисел, представимых в памяти компьютера. Для этого в подпрограмме пользователя значения $J(x)$ умножаются на постоянный для текущего цикла оптимизации множитель. Как правило, необходимо вначале нормализовать управляемые параметры, затем промасштабировать значения $J(x)$, а далее перейти к уравниванию производных.

Рассмотрим методы диагонализации. В качестве основной процедуры приведения симметричной матрицы к главным осям может быть использован метод Якоби [11], несмотря на наличие конкурирующих, вообще говоря, более эффективных вычислительных схем [12]. Данный выбор обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, вычисленные методом Якоби собственные векторы всегда строго ортонормальны с точностью, определяемой точностью компьютера, даже при кратных собственных числах. Последнее весьма существенно при использовании этих векторов в качестве базиса, т. к. предотвращается возможность вырождения базиса, существующая, например, в методе Пауэлла [13]. Во-вторых, многие вычислительные схемы имеют преимущество перед методом Якоби лишь при решении частичной проблемы собственных значений. В нашем же случае всегда решается полная проблема, и поэтому выигрыш во времени оказывается несущественным при существенно более сложных вычислительных схемах. В-третьих, алгоритмы, основанные на методах Якоби, часто оказываются наиболее доступными, т. к. соответствующие программы имеются в большинстве вычислительных систем. И, наконец, определенное влияние на выбор алгоритма оказала простота логики метода Якоби, что приводит к компактности и надежности реализующих его программ.

В задачах большой размерности по

сравнению с методом Якоби более предпочтительным по объему вычислительных затрат оказывается метод, использующий преобразование Хаусхолдера для приведения матрицы к трехдиагональной форме с последующим обращением к QR -алгоритму определения собственных векторов симметричной трехдиагональной матрицы [12].

В методе Якоби исходная симметричная матрица A приводится к диагональному виду с помощью цепочки ортогональных преобразований вида

$$A_{k+1} = U_k^T A_k U_k, A_0 = A, k = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

являющихся преобразованиями вращения. В результате надлежащего выбора последовательности $\{U_k\}$ получаем $\lim A_k = D = U^T A U, k \rightarrow \infty$, где $D = \text{diag}(\lambda_i)$ — диагональная матрица; $U = U_0 U_1 U_2 \dots$ — ортогональная матрица. Так как (4) есть преобразования подобия, то на диагонали матрицы D расположены собственные числа матрицы A ; столбцы матрицы U есть собственные векторы матрицы A . В действительности вместо матрицы U получается некоторая матрица $V = \Lambda(A)$, отличная, вообще говоря, от истинной матрицы U . Основные характеристики оператора Λ были рассмотрены выше.

Элементарный шаг (13) процесса Якоби заключается в преобразовании посредством матрицы $U_k = \{u_{ij}\}$, отличающейся от единичной элементами $u_{pp} = u_{qq} = \cos \varphi$, $u_{pq} = u_{qp} = \sin \varphi$. Угол вращения φ выбирается таким образом, чтобы сделать элемент a_{pq} матрицы A нулем. Вопросы сходимости различных численных схем, реализующих метод Якоби, рассмотрены в [14].

За основу может быть взят алгоритм *Jacobi* из сборника алгоритмов линейной алгебры [15], реализующий так называемый *частный циклический метод Якоби*. В этом методе аннулированию подвергаются все элементы верхней треугольной части матрицы A с применением построчного выбора.

При таком выборе индексы элементов a_{pq} пробегают последовательность значений $(1, 2), (1, 3), \dots, (1, n); (2, 3), (2, 4), \dots, (2, n); \dots; (n-1, n)$. Затем начинается новый цикл перебора элементов в том же порядке. Эмпирическая оценка трудоемкости процесса построения матрицы $\Lambda(A)$ позволяет выделить необходимое время T работы процессора через размерность n решаемой задачи. Известно, что для матриц до 50-го порядка и длин машинных слов от 32 до 48 двоичных разрядов общее число циклов в процессе вращений Якоби в среднем не превышает 6–10 (под циклом понимается любая последовательность из $(n^2 - n)/2$ вращений). При этом $T \cong kn^3$, где коэффициент k определяется быстродействием применяемой вычислительной системы и приблизительно равен $40t_y$, где t_y — время выполнения операции умножения.

Полученная оценка, а также опыт практической работы показывают, что при умеренных n время реализации оператора Λ для многих практических случаев невелико и сравнимо с временем однократного вычисления значения минимизируемого функционала. Упомянутая выше комбинация метода Хаусхолдера и QR -алгоритма оказывается приблизительно в 1,5–2 раза быстрее, что может иметь значение при достаточно больших n .

Различные версии алгоритмов, учитывающие специфику решаемых классов прикладных задач, отличаются, в основном, методами построения аппроксимаций матриц $G(x)$. Соответствующие вопросы в данной статье не рассматриваются. Практическое применение изложенного подхода показывает, что при решении жестких оптимизационных задач эффективность методов последовательной релаксации существенно повышается за счет локального сведения исходной жесткой задачи к нескольким слабо связанным задачам с пониженными показателями жесткости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. СПб.: БХВ-

Петербург, 2011. 384 с.

2. Черноруцкий И.Г. Методы параметриче-



ской оптимизации в задачах идентификации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 2(76). С. 150–155.

3. **Черноруцкий И.Г.** Параметрические методы синтеза систем управления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 2(76). С. 111–115.

4. **Черноруцкий И.Г.** Алгоритмические проблемы жесткой оптимизации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 6(162). С. 141–152.

5. **Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г.** Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979. 208 с.

6. **Черноруцкий И.Г.** Функции релаксации градиентных методов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 3(150). С. 66–72.

7. **Черноруцкий И.Г.** Некоторые стандартные схемы параметрической оптимизации // Научно-

технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 6(162). С. 128–133.

8. **Черноруцкий И.Г.** Градиентные методы с экспоненциальной функцией релаксации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. № 5(181). С. 58–66.

9. **Базара М., Шетти К.** Нелинейное программирование. М.: Мир, 1982.

10. **Зангвилл У.И.** Нелинейное программирование. М.: Сов. радио, 1973.

11. **Уилкинсон Дж.Х.** Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, 1970.

12. **Парлетт Б.** Симметричная проблема собственных значений. М.: Мир, 1983.

13. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.

14. **Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1963.

15. **Уилкинсон Дж.Х., Райнш С.** Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. М.: Машиностроение, 1976.

REFERENCES

1. **Chernorutskiy I.G.** *Metody optimizatsii. Kompyuternyye tekhnologii.* St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2011, 384 p. (rus)

2. **Chernorutskiy I.G.** Metody parametricheskoy optimizatsii v zadachakh identifikatsii [Methods of parametrical optimisation in identification problems], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 2(76), Pp. 150–155. (rus)

3. **Chernorutskiy I.G.** Parametricheskiye metody sinteza sistem upravleniya [Parametrical methods of synthesis of control systems], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 2(76), Pp. 111–115. (rus)

4. **Chernorutskiy I.G.** Algoritmicheskiye problemy zhestkoy optimizatsii [Algorithmic problems of stiff optimization], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 6(162), Pp. 141–152. (rus)

5. **Rakitskiy Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskiy I.G.** *Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem.* Moscow: Nauka Publ., 1979, 208 p. (rus)

6. **Chernorutskiy I.G.** Funktsii relaksatsii gradiyentnykh metodov [Relaxation function

of gradient methods], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 3(150), Pp. 66–72. (rus)

7. **Chernorutskiy I.G.** Nekotoryye standartnyye skhemy parametricheskoy optimizatsii [Standard schemes of parametric optimization], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 6(162), Pp. 128–133. (rus)

8. **Chernorutskiy I.G.** Gradiyentnyye metody s eksponentsialnoy funktsiyey relaksatsii [Gradient methods with exponent relaxation function], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie.* St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2013, No. 5 (181), Pp. 58–66. (rus)

9. **Bazara M., Shetti K.** *Nelineynoye programmirovaniye.* Moscow: Mir Publ., 1982. (rus)

10. **Zangvill U.I.** *Nelineynoye programmirovaniye.* Moscow: Sovetscoe radio Publ., 1973. (rus)

11. **Uilkinson Dzh.Kh.** *Algebraicheskaya problema sobstvennykh znacheniy.* Moscow: Nauka Publ., 1970. (rus)

12. **Parlett B.** *Simmetrichnaya problema sobstvennykh znacheniy.* Moscow: Mir Publ., 1983. (rus)

13. Khimmelblau D. *Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye*. Moscow: Mir Publ., 1975. (rus) 1963. (rus)
14. Faddeyev D.K., Faddeyeva V.N. *Vychislitelnyye metody lineynoy algebry*. Moscow: Fizmatgiz Publ., 15. Uilkinson Dzh.Kh., Raynsh S. *Spravochnik algoritmov na yazyke ALGOL*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1976. (rus)
-

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич — заведующий кафедрой информационных и управляющих систем Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: igcher1946@mail.ru

CHERNORUTSKIY, Igor G. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: igcher1946@mail.ru

УДК 681.58

В.Н. Круглов, Л.Г. Доросинский, Ю.В. Чирышев

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СТРУИ В ПРЕДЕЛАХ ТЕЛЕВИЗИОННОГО КАДРА

V.N. Krouglov, L.G. Dorosinsky, Yu.V. Chiryshev

DEVELOPMENT OF SERVO SYSTEM MODEL TO CONTROL STREAM POSITION WITHIN VIDEO FRAME

Рассмотрена структурная схема модели следящей системы, приведены расчетные методики для определения параметров входных воздействий и следящего привода на базе электромеханического шагового двигателя. Изучена математическая модель следящей системы, даны результаты динамического имитационного моделирования с применением программного пакета Simulink Response Optimization.

СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА; МОДЕЛЬ; ПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ; ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; ПИД-РЕГУЛЯТОР; ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА; СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ; РОБАСТНОСТЬ.

The block diagram and mathematical model of servo-system is considered and calculation methods for determination of parameters of input actions and servo-system on the base of step-by-step motor are given. The dynamic simulation method is used for the system description. Optimal controller parameters were found using the Simulink Response Optimization toolbox.

SERVO-SYSTEM; MODEL; MELTING FURNACE; STEPPER MOTOR; PID CONTROLLER; TV CAMERA; COMPUTER VISION SYSTEM; ROBUSTNESS.

Анализ проблемы энергосбережения показывает, что один из наиболее эффективных путей ее решения заключается в сокращении потерь тепла через ограждающие конструкции зданий, сооружений и тепловых сетей. Этим объясняется интенсивное развитие производства теплоизоляционных материалов, в частности, минеральной ваты. При ее производстве одним из основных контролируемых параметров является дебит расплава, вытекающего из плавильного агрегата.

В настоящее время наиболее перспективными средствами измерения дебита расплава металлургических печей, работающих в непрерывном режиме технологического цик-

ла, являются приборы на основе систем технического зрения [1]. Особенность процесса истечения высокотемпературной струи расплава заключается в постоянном изменении ее местоположения. В зарубежных аналогах таких систем, например системе фирмы Gamma Meccanica SpA (Италия), проблема определения местоположения струи в пределах видеокadra решается за счет увеличения угла поля зрения объектива видеокамеры. Однако это приводит к ухудшению разрешающей способности оптической системы и, как следствие, к увеличению погрешности оценки диаметра струи и ее дебита [2]. Вот почему для сохранения необходимой разрешающей способности оптической си-

стемы необходимо включение в состав рассматриваемых приборов следящей системы, контролирующей местоположение струи, а оценка параметров такой системы является актуальной задачей.

В статье предлагается модель следящей системы, предназначенной для поддержания углового значения линии визирования телевизионной камеры, направленной на струю расплава, вытекающую из плавильной печи. Управлению подлежит угол поворота линии визирования видеокамеры, другими словами, система должна управлять углом поворота вала двигателя, связанного с видеокамерой.

В процессе проектирования следящей системы необходимо учитывать широкий круг технических требований, влияющих в конечном счете на единый критерий качества системы. К названным требованиям следует отнести:

динамические характеристики, определяющие ошибки в системе управления при различных режимах работы;

надежность работы системы, устойчивость к влиянию внешних воздействий;

характер эксплуатации системы;

допустимое потребление энергии и т. д.

Для исследования различных характеристик системы должна использоваться компьютерная модель, т. к. в процессе проектирования возникнет потребность в проведении числовых экспериментов в условиях, приближенных к реальным. В результате того что модель окажется в тех же условиях и будет подвергнута тем же внешним воздействиям, при которых будет работать реальная система, мы сможем получить количественные оценки поведения системы.

Адекватным подходом к исследованию следящей системы, находящейся под влиянием случайных воздействий, является применение статистических методов, которые дают возможность учесть случайный характер воздействия.

Для проектируемой следящей системы критерием оптимального управления будем считать такой режим, когда установившееся значение дисперсии ошибки минимально.

Характер входного воздействия проектируемой системы со временем меняется

и в общем случае представляет собой нестационарный случайный процесс. Есть интервалы времени, когда струя течет «спокойно», при этом можно достоверно определить статистические характеристики этого случайного процесса. Когда прочищается выпускное отверстие плавильной печи (летка), входное воздействие системы представляет собой случайный процесс с параметрами, изменяющимися во времени.

«Спокойное» поведение струи не представляет практического интереса, поскольку дисперсия случайного процесса является очень малой величиной. Струя расплава постоянно находится в кадре. Следить за струей нужно в те периоды времени, когда струя отклоняется от центра кадра или движется за пределы видимости кадра, например, при расширении летки. Поведение струи в такие моменты представляет собой нестационарный процесс.

При использовании для целей динамического синтеза методов оптимальной фильтрации необходимо априорное знание статистических характеристик полезного сигнала и помехи. Построение простой, достаточно достоверной модели входного воздействия в данном случае сделать не удастся, т. к. анализ свойств нестационарных случайных процессов представляет собой сложную задачу. Переход к структуре, содержащей устройства адаптации, лишь усложнит систему. Вот почему представляется целесообразным построение робастной системы управления, которая обеспечит требуемое качество слежения при изменении статистических характеристик входных воздействий в широких пределах.

В качестве исполнительного элемента в следящих системах широкое распространение получили шаговые двигатели (ШД). Связано это с тем, что они обладают некоторыми свойствами, которые делают их исключительно удобными для применения:

угол поворота ротора определяется числом импульсов, поданных на двигатель;

точность составляет 3–5 % от величины шага, причем ошибка не накапливается от шага к шагу;

старт/остановка/реверсирование осуществляются практически безынерционно;



надежность определяется только сроком службы подшипников.

Применение шаговых приводов обусловлено еще и тем обстоятельством, что они естественным образом сочетаются с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами. Именно по этим соображениям использование шагового двигателя в качестве исполнительного устройства для рассматриваемой системы является наиболее предпочтительным.

В общем случае поведение m -фазного шагового двигателя описывается системой из $m + 1$ уравнений, причем m уравнений являются уравнениями электрического равновесия и одно — уравнением движения ротора [3]:

$$\begin{cases} R \cdot i_m(t) + L \frac{di_m(t)}{dt} + E_m = u_m(t) \\ J \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + K \frac{d\alpha(t)}{dt} + F \frac{d\alpha(t)}{dt} + M_n(t) = M(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $u_m(t)$ — мгновенное значение напряжения на фазе статора; R — сопротивление статора; $i_m(t)$ — мгновенное значение тока в фазе; L — индуктивность фазы; E_m — наведенная ЭДС в фазной обмотке; α — угол поворота ротора; J — приведенный момент инерции привода; K — коэффициент демпфирования силами вязкого трения; F — момент сухого трения; $M_n(t)$ — общий момент нагрузки; $M(t)$ — мгновенное значение синхронизирующего момента шагового двигателя.

Дальнейшее упрощение заключается в линеаризации уравнений, переходу к операторной форме и записи передаточной функции шагового двигателя при отработке одного шага в виде $W_{\text{ов}}(p) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i}$, где p — оператор Лапласа; Θ_0 — преобразование Лапласа действительного углового положения; Θ_i — преобразование Лапласа требуемого значения угла [3, 4].

Переходный процесс ротора шагового двигателя при каждом шаге учитывается введением непрерывного звена. Передаточ-

ная функция такого звена при единичном ступенчатом воздействии может быть определена следующим образом:

$$W_H(p) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{1}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (2)$$

$$\text{где } T = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{J}{P \cdot M_m}};$$

$\xi = \frac{9,81 \cdot 10^{-5} \cdot M_m}{P \cdot I^2 \cdot R} \omega_0 \cdot k_{\text{ш}}$; ω_0 — собственная частота малых колебаний ротора около положения равновесия; P — число пар полюсов двигателя; M_m — максимальный статический синхронизирующий момент двигателя; J — момент инерции привода; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент, учитывающий демпфирование обмоток ШД (изменяется в пределах от 1 до 2); R — сопротивление фазы статора.

Электромагнитные переходные процессы могут быть учтены звеном чистого запаздывания $e^{-\tau_{\text{дв}} p}$. Передаточная функция при этом принимает вид:

$$W_H(p) = \frac{e^{-\tau_{\text{дв}} p}}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{дв}}$ — постоянная времени, определяемая отношением индуктивности и активного сопротивления цепи обмоток управления.

Перед непрерывным звеном должен быть включен формирующий элемент. В эквивалентных схемах используется формирующий элемент типа фиксатора уровня, что соответствует особенностям двигателя затормаживаться после каждого шага. Передаточная функция фиксатора имеет вид:

$$\Phi(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}. \quad (4)$$

Таким образом, эквивалентную схему можно представить в виде последовательного соединения звеньев $\Phi(p)$ и $W_H(p)$.

Очевидно, реакция модели на любой входной сигнал не должна отличаться от реакции шагового двигателя на этот сигнал, т. к. только при этом условии возможна замена шагового двигателя эквивалентной схемой в общей структурной схеме следящей системы. Реакция θ_0 на шаговую функцию θ_i приведена на рис. 1.

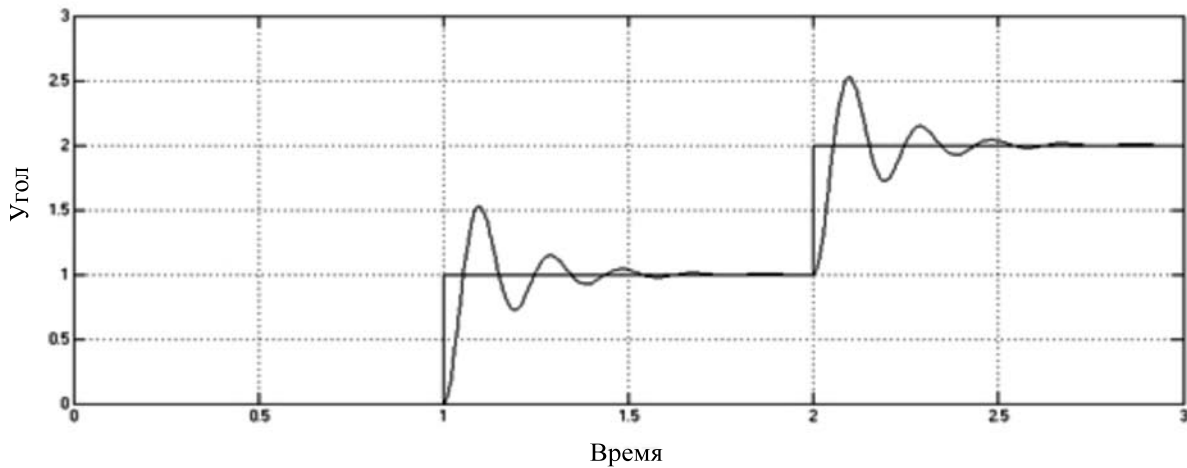


Рис. 1. Перемещения ротора

Перемещение ротора является колебательным затухающим процессом, амплитуда и время затухания которого зависят от параметров конкретного привода и нагрузки.

Цель синтеза робастной системы заключается в том, чтобы выходная переменная системы за минимальное время и с требуемой точностью воспроизводила все изменения входного сигнала. Любая практическая система содержит элементы емкостного и индуктивного типа, накапливающие энергию. Именно эти элементы в сочетании с элементами, рассеивающими энергию, обуславливают динамику системы слежения. Поэтому цель управления сформулируем следующим образом: амплитудную характеристику системы надо стремиться сделать как можно ближе к единице в как можно большем интервале частот.

В качестве устройства управления используется ПИД-регулятор с передаточной функцией [5]:

$$W_{\text{пид}}(p) = K_{\text{п}} + \frac{K_{\text{и}}}{p} + K_{\text{д}}p. \quad (5)$$

Его структурная схема приведена на рис. 2.

Во временной области выходная переменная регулятора $u(t)$ и его входная переменная $e(t)$ связаны уравнением:

$$u(t) = K_{\text{п}}e(t) + K_{\text{и}} \int e(t)dt + K_{\text{д}} \frac{de(t)}{dt}. \quad (6)$$

Выбор трех коэффициентов ПИД-регулятора по сути и есть задача отыскания такого устройства управления, при котором обеспечивались бы желаемые показатели качества системы.

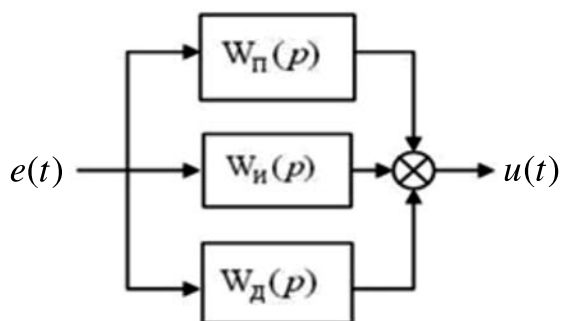


Рис. 2. Структурная схема ПИД-регулятора

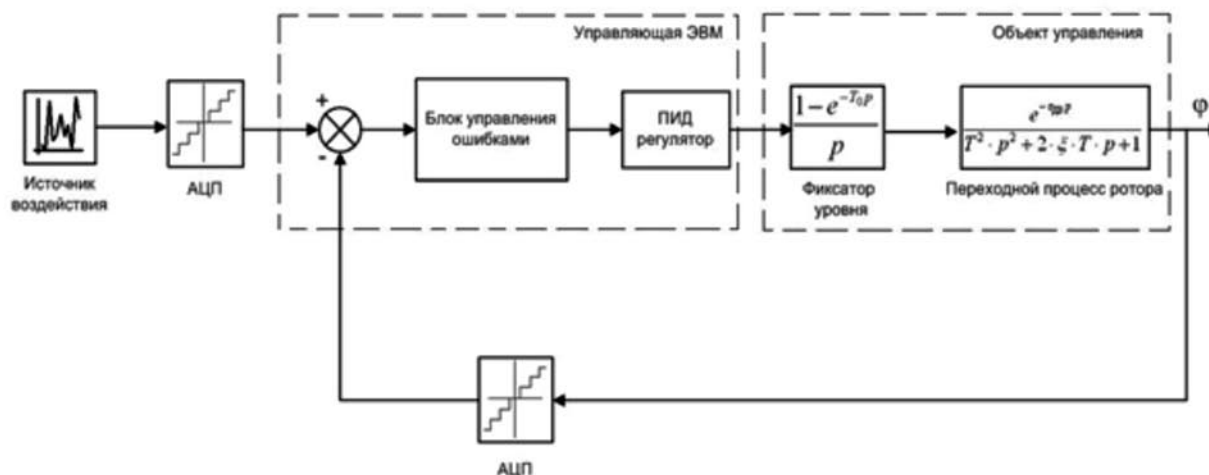


Рис. 3. Структурная схема приближенной модели системы управления:
φ – текущее значение угла поворота исполнительного вала

Система управления цифровым следящим приводом на основе электромеханического шагового двигателя может быть описана структурной схемой, приведенной на рис. 3. Данная модель представляет собой описание каскадной одноконтурной следящей системы автоматического управления позиционированием углового положения видеокамеры. Соответствующая ей модель, построенная из блоков пакета Simulink, показана на рис. 4. В фиксированные моменты времени, следующие с периодом дискретизации T_d , управляющая программа

сравнивает текущее положение струи расплава, приведенное к угловому положению вала двигателя, с угловым положением видеокамеры.

Значение T_d определяется аналого-цифровыми преобразователями Quantizer и Quantizer1.

Если струя находится в центре кадра или ее отклонение от середины не превышает определенного порога (струя находится в зоне нечувствительности), блок управления ошибками (Control of errors) игнорирует такое незначительное отклоне-

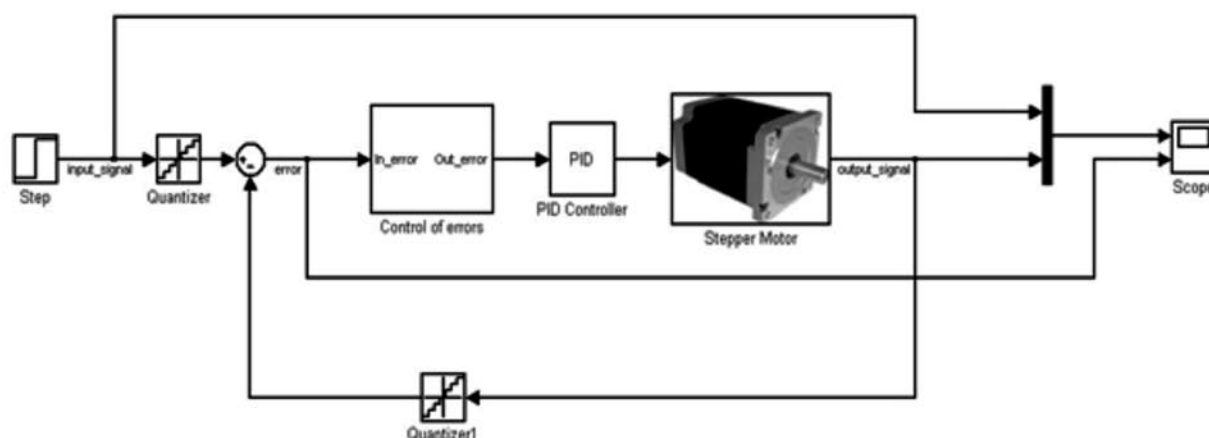


Рис. 4. Модель системы управления:

Step – источник ступенчатого воздействия; Quantizer, Quantizer1 – аналого-цифровые преобразователи;
Control of errors – подсистема управления ошибками; PID Controller – дискретный ПИД-регулятор;
Stepper Motor – подсистема шагового привода; Scope – осциллограф

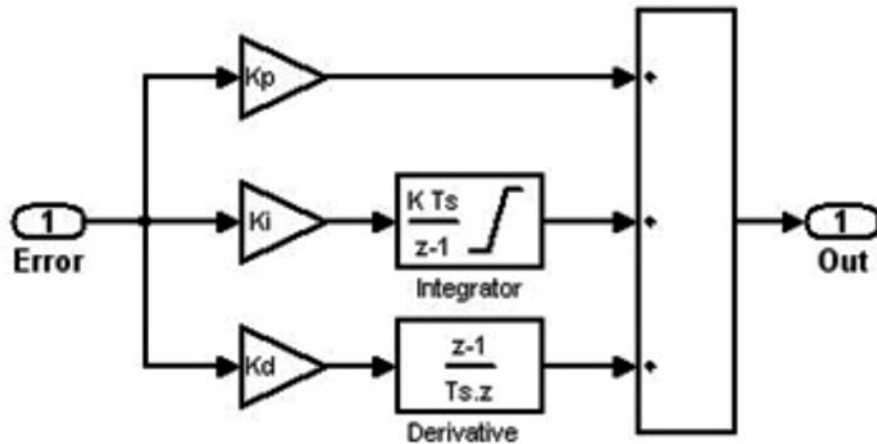


Рис. 5. Структура цифрового ПИД-регулятора:
Integrator – блок интегрирования; Derivative – блок дифференцирования;
 K_p , K_i , K_d – коэффициенты регулятора

ние и подает на регулятор (PID Controller) нулевую ошибку. При этом на шаговый двигатель не подается управляющего воздействия, он не меняет своего положения. Если программа определяет, что струя находится вне зоны нечувствительности, текущее значение ошибки попадет на вход регулятора, на выходе которого формируется сигнал управления шаговым двигателем для минимизации ошибки отклонения.

Структура цифрового ПИД-регулятора, показанная на рис. 5, отличается от структуры аналогового (см. рис. 2) лишь тем, что операторы дифференцирования и интегрирования в классическом уравнении ПИД-регулятора (6) заменены конечными разностями и конечными суммами. В результате получаем модель управляемого объекта и структуру системы управления. Далее необходимо получить линеаризован-

ную модель, которая будет использоваться для настройки системы управления. Для этого используем пакет Simulink Control Design. В нем выбираем те объекты, которые необходимо настроить. Так как устройством управления данной системы является ПИД-регулятор, он и будет выбран. Затем нужно задать частотные и временные характеристики – требования к системе.

Основным показателем качества работы системы является обеспечение отработки входного воздействия с минимальной ошибкой. Для того чтобы заданное воздействие воспроизводилось с ошибкой не более $e_{\max}^0$, ЛАХ проектируемой системы не должна заходить в запретную область, ограниченную двумя прямыми с наклонами -20 дБ и -40 дБ [6, 8]. Для определения требований к низкочастотной части ЛАХ необходимо знать максимальное по модулю

Исходные данные

Максимальная скорость входного воздействия, град/с	1,6
Максимальное ускорение входного воздействия град/с ²	0,4
Максимально допустимая ошибка слежения $e_{\max}^0$, град	3
Период дискретизации T_d , с	0,3

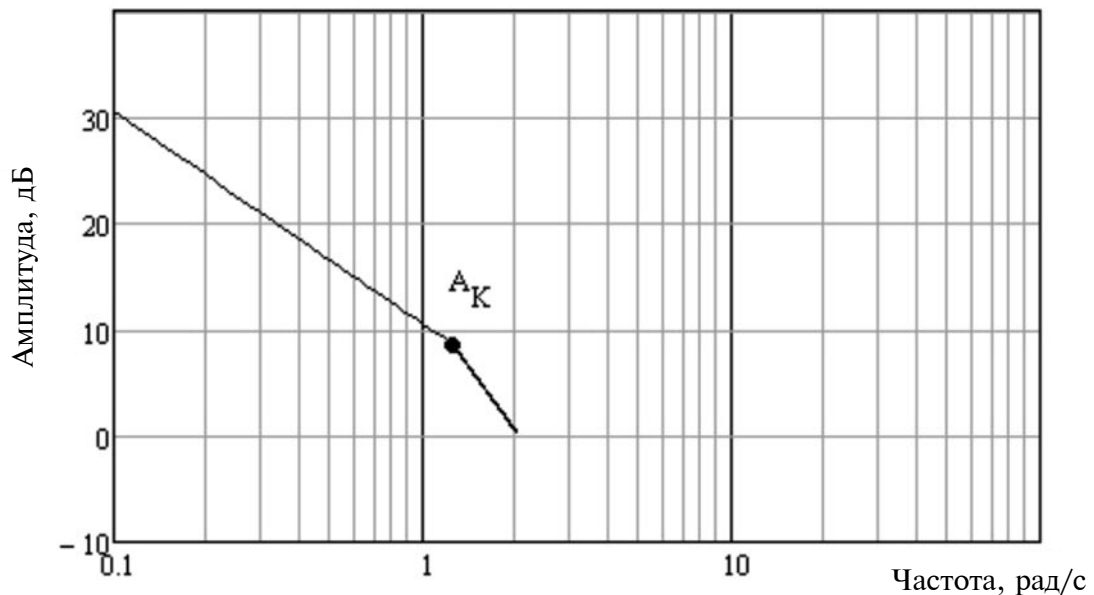


Рис. 6. Контрольные точки для ЛАХ из условия точности воспроизведения входного сигнала

значение скорости $\dot{g}_{\max}$, максимальное по модулю значение ускорения $\ddot{g}_{\max}$ входного сигнала $g(t)$ и максимально допустимую ошибку слежения $e_{\max}^0$.

Детальный анализ динамических характеристик струи расплава проводился с помощью базы видеоизображений, содержащей более 3500 кадров. В результате проделанной работы были определены скорость и ускорение перемещения струи в горизонтальном направлении. Исходя из условий технологического процесса, дальности расположения видеокамеры от струи расплава, угловых размеров поля зрения объектива задается максимально допустимая ошибка слежения, равная трем градусам. Полученные данные сведены в таблицу.

В соответствии с [6, 7] построена запретная область ЛАХ системы, удовлетворяющей требованию, чтобы максимальная ошибка не превышала заданного значения $e_{\max}^0 = 3$ град, приведенная на рис. 6.

Кроме этого введем дополнительные ограничения:

время переходного процесса при отработке ступенчатого воздействия не более 1 с;
перерегулирование – не более 15 %.

Для нахождения оптимальных параметров ПИД-регулятора использовался пакет численной оптимизации Simulink Response Optimization с предварительно заданными ограничениями на ступенчатый входной сигнал и низкочастотную часть ЛАХ. Достоинства пакета заключаются в том, что оптимизация параметров осуществляется в автоматическом режиме. В результате проведенного моделирования определены оптимальные параметры ПИД-регулятора, которые имеют следующие численные значения:

$$K_p = 0,87, \quad K_I = 4,48, \quad K_D = 0,001.$$

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

разработана математическая модель системы слежения на основе электромеханического шагового двигателя;

выполнен анализ динамических характеристик процесса истечения струи расплава на базе предприятия ОАО «АКСИ» (г. Челябинск), в результате которого определена максимально допустимая ошибка слежения, не превышающая трех градусов углового отклонения линии ви-

зирования видеокамеры от местоположения струи расплава в горизонтальном направлении;

для выбранного критерия оптимизации

следящей системы путем математического моделирования определены оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора следящей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sirok B., Blagojevich B. Mineral wool. WoodHead Publishing limited, Cambridge, England, 2008. P. 184.

2. Круглов В.Н. Способ определения производительности плавильного агрегата // Патент РФ № 2469962. Приоритет 06.07.2011.

3. Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод. Л.: ЛО «Энергия», 1980. 168 с.

4. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

5. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.

6. Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления и микроЭВМ. М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1987. 320 с.

7. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1976. 576 с.

8. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». М.: Высш. шк., 1990. 335 с.

REFERENCES

1. Sirok B., Blagojevich B. Mineral wool. WoodHead Publishing limited, Cambridge, England, 2008, P. 184.

2. Kruglov V.N. Sposob opredeleniya proizvoditel'nosti plavil'nogo agregata. Patent RF, No. 2469962 [Patent for the method of determining the performance of the melting unit], Prioritet 06.07.2011. (rus)

3. Gumen V.F., Kalininskaya T.V. Sledyashchiy shagovyy elektroprivod [Tracking stepper actuator], Leningrad: Energiya Publ., 1980, 168 p. (rus)

4. Kenio T. Shagovyye dvigateli i ikh mikroprotsessornyye sistemy upravleniya. Moscow:

Energoatomizdat Publ., 1987, 200 p. (rus)

5. Olsson G., Piani D. Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya. St. Petersburg: Nevskiy Dialekt Publ., 2001, 557 p. (rus)

6. Besekerskiy V.A., Izrantsev V.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i mikroEVM. Moscow: Nauka Publ. Gl. red. Fizmatlit, 1987, 320 p. (rus)

7. Besekerskiy V.A. Tsifrovyye avtomaticheskiye sistemy. Moscow: Nauka Publ. Gl. red. Fizmatlit, 1976, 576 p. (rus)

8. Kononov G.F. Radioavtomatika. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990, 335 p. (rus)

КРУГЛОВ Василий Николаевич — доцент кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кандидат технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: v.krouglov@mail.ru

KROUGLOV, Vasilii N. Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: v.krouglov@mail.ru

ДОРОСИНСКИЙ Леонид Григорьевич — профессор кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: l.dorosinsky@mail.ru

DOROSINSKY, Leonid G. Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: l.dorosinsky@mail.ru



ЧИРЫШЕВ Юрий Владимирович — аспирант кафедры информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: iurii.chiryshev@mail.ru

CHIRYSHEV, Yuri V. *Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin.*

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: iurii.chiryshev@mail.ru

УДК 681.05

С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЕСА ЗВЕНЬЕВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СТЕНДЕ ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ

S.A. Gayvoronskiy, T.A. Ezangina

ROBUST CONTROL WEIGHT COMPENSATION LINKS SPACECRAFT STAND WEIGHTLESSNESS SIMULATION

Разработана структура системы стабилизации натяжения троса для стенда имитации невесомости. Предложен алгоритм параметрического синтеза робастного ПИ-регулятора на основе коэффициента метода и критерия максимальной степени устойчивости в условиях интервальной неопределенности параметров системы. Работоспособность синтезированной робастной системы подтверждают результаты цифрового моделирования.

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАТЯЖЕНИЯ ТРОСА; СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА; МАКСИМАЛЬНАЯ РОБАСТНАЯ СТЕПЕНЬ УСТОЙЧИВОСТИ; РОБАСТНАЯ СТЕПЕНЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ.

The structure of the robust stabilization system cable tension to stand simulates weightlessness. An algorithm of parametric synthesis of robust PI-controller based coefficient method and maximum degree of stability criterion. Robust performance of the synthesized system confirms the results of digital simulation.

STABILITY CABLE TENSION; SYNTHESIS OF ROBUST CONTROLLERS; MAXIMAL ROBUSTNESS DEGREE OF STABILITY; ROBUSTNESS DEGREE OF VIBRATIONAL.

Космические аппараты (КА) содержат элементы, которые при выходе на орбиту переводятся из транспортировочного положения в рабочее. Стенд имитации невесомости (СИН) позволяет в наземных условиях имитировать движение таких элементов КА в условиях космоса. Кинематическая схема СИН [1] показана на рис. 1, где обозначены: 1 – трос; 2 – датчик натяжения троса; 3 – датчик вертикальности троса; 4 – привод горизонтального канала СИН; 5 – привод вертикального канала СИН; 6 – движущийся элемент КА; 7 – груз-противовес.

Согласно [1] критериями имитации невесомости в процессе движения элемента КА являются постоянство силы натяжения троса и постоянство вертикального положения троса. Для выполнения этих условий служат соответственно вертикальные и горизонтальные каналы управления, реализуемые с помощью автоматических систем. Последние характеризуются многомассовостью, наличием упругих связей, а также переменных и неопределенных параметров.

Упругим элементом в системах управления является трос, параметрами которого служат удельное значение жесткости $C_{уд}$ и коэффициент демпфирования колебаний $\chi_{уд}$. Участки троса между инерционными звеньями в процессе их движения изменяют свою длину l , а следовательно, и параметры $C = C_{уд} / l$ и $\chi = \chi_{уд} / l$. Заметим, что пределы изменения длин участков троса заранее известны, поэтому C и χ каждого участка можно считать интервальными параметрами.

При рассмотрении СИН необходимо отметить, что в процессе движения элемента КА его вес распределяется между точкой опоры элемента и точкой подвеса. Данное обстоятельство при анализе и синтезе систем управления может быть учтено интервальным заданием массы элемента КА.

Постановка задачи. В данной статье разрабатывается вертикальный канал СИН, который должен обеспечивать выполнение первого критерия имитации невесомости: постоянство силы натяжения троса. Верти-

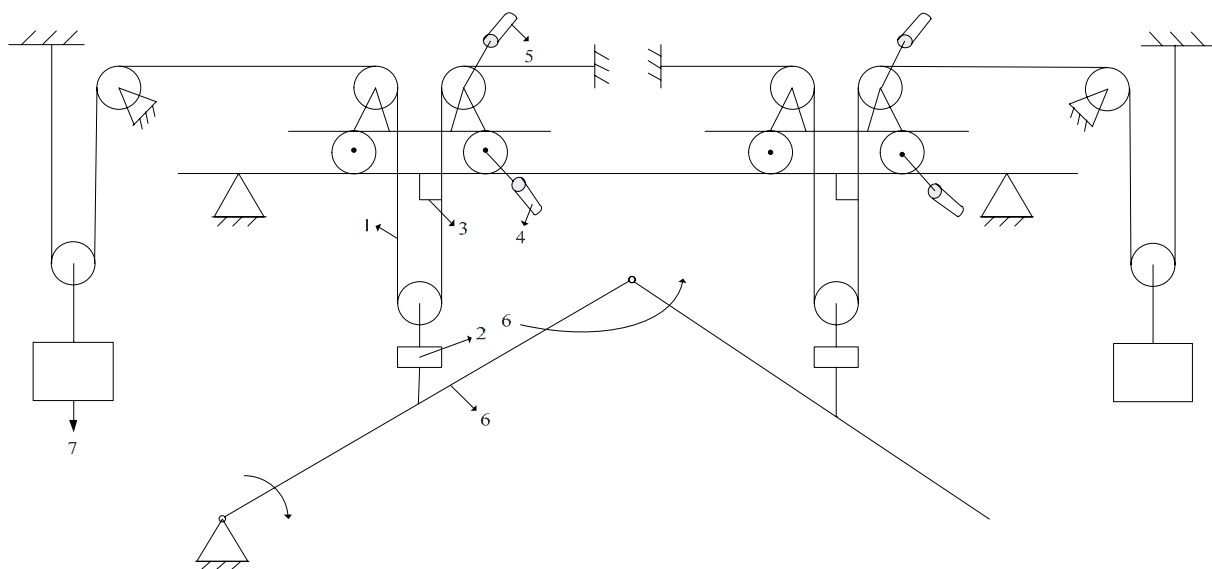


Рис. 1. Кинематическая схема стенда имитации невесомости

кальный канал представляет собой упругую трехмассовую систему стабилизации натяжения троса (ССНТ) с интервальными параметрами.

В настоящее время разработано большое количество методов синтеза систем управления с интервальными параметрами [2–4]. Для синтеза ССНТ мы предлагаем применить интервальное расширение коэффициентного метода [5], основанного на использовании коэффициентных показателей качества. Последние определяются на основании интервальных коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы (в которые входят интервальные параметры объекта управления и настройки регулятора).

В связи с тем, что динамические процессы в ССНТ с интервальными параметрами должны быть быстропротекающими, в качестве критерия синтеза робастного регулятора выбран критерий максимального быстродействия. Предлагаемый для его реализации корневой подход предусматривает максимизацию робастной степени устойчивости ССНТ выбором соответствующих параметров робастного регулятора. При его синтезе предлагается также ввести ограничение на колебательность системы.

Основные соотношения для синтеза робастного регулятора. Коэффициентный

метод [5] использует соотношения между коэффициентами характеристического полинома $P(s) = \sum_{i=0}^n p_i s^i$ замкнутой системы и показателями ее качества. Согласно [6] робастное расширение коэффициентного метода на интервальные системы позволяет для анализа устойчивости применять верхнюю границу интервального показателя устойчивости $\bar{\lambda}_i = \bar{p}_{i-1} \bar{p}_{i+2} / \underline{p}_i \underline{p}_{i+1}$, $i = 1, n-2$, где $\bar{p}_i$ – верхний предел, $\underline{p}_i$ – нижний предел i -го коэффициента характеристического полинома. На основе $\bar{\lambda}_i$ получено достаточное условие робастной устойчивости системы $\bar{\lambda}_i < 0,465$.

Очевидно, что при проектировании ССНТ с интервальными параметрами представляет интерес не столько обеспечение устойчивости системы, сколько гарантия сохранения ее допустимого качества в процессе движения элемента КА. Обеспечить желаемые динамические свойства интервальной ССНТ предлагается с помощью робастного ПИ-регулятора, имеющего передаточную функцию $W_p(s) = k_1 + k_2 s / s$, $\bar{k} = (k_1, k_2)$ – вектор настроек регулятора.

Для решения задачи синтеза ПИ-регулятора предлагается использовать достаточное условие заданной степени устойчивости η интервальной системы [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\overline{p_{i-1}(\bar{k})} \overline{p_{i+2}(\bar{k})}}{(\overline{p_i(\bar{k})} - \overline{p_{i+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta)(\overline{p_{i+1}(\bar{k})} - \overline{p_{i+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta)} < 0,465, \quad i = \overline{1, n-2}; \\ \overline{p_m(\bar{k})} - \overline{p_{m+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta \geq 0, \quad m = \overline{1, n-1}; \\ \overline{p_0(\bar{k})} - \overline{p_1(\bar{k})}\eta + 2\overline{p_2(\bar{k})} \frac{\eta^2}{3} \geq 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Вхождение степени устойчивости η в условия (1) дает возможность ее максимизации настройками $\bar{k}$ ПИ-регулятора.

Коэффициентный метод позволяет также формировать условия, ограничивающие колебательность интервальной ССНТ. Для этого можно использовать нижнюю границу показателя колебательности $\delta_z = \overline{p_z^2} / (\overline{p_{z-1} p_{z+1}})$, $z = \overline{1, n-1}$. Основанное на δ_z достаточное условие робастной колеба-

тельности имеет вид $\delta_z > \delta_d$, где δ_d – допустимый показатель колебательности, определяемый из таблицы, приведенной в [7, с. 6].

Основываясь на приведенных выше условиях, для синтеза робастного регулятора предлагается выбором его параметров максимизировать робастную степень устойчивости системы при ограничении на ее колебательность. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\overline{p_{i-1}(\bar{k})} \overline{p_{i+2}(\bar{k})}}{(\overline{p_i(\bar{k})} - \overline{p_{i+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta)(\overline{p_{i+1}(\bar{k})} - \overline{p_{i+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta)} = 0,465, \quad i = \overline{1, n-2}; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\overline{p_{j-1}(\bar{k})} \overline{p_{j+2}(\bar{k})}}{(\overline{p_j(\bar{k})} - \overline{p_{j+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta)(\overline{p_{j+1}(\bar{k})} - \overline{p_{j+2}(\bar{k})}(n-i-2)\eta)} < 0,465, \quad j = \overline{1, n-2}, \quad j \neq i; \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\overline{p_m(\bar{k})} - \overline{p_{m+1}(\bar{k})}(n-i-1)\eta \geq 0, \quad m = \overline{1, n-1}; \quad (4)$$

$$\overline{p_0(\bar{k})} - \overline{p_1(\bar{k})}\eta + 2\overline{p_2(\bar{k})} \frac{\eta^2}{3} \geq 0; \quad (5)$$

$$\overline{p_z^2} / \overline{p_{z-1} p_{z+1}} \geq \delta_d, \quad z = \overline{1, n-1}. \quad (6)$$

Количество условий (2)–(6), проверяемых при нахождении значений настроек регулятора, определяется числом коэффициентов характеристического полинома интервальной системы. Из полученных наборов значений параметров регулятора выбираются те, которые обеспечивают максимальное значение η .

Математическая модель системы стабилизации натяжения троса. На основании дифференциальных уравнений, описывающих динамику отдельных элементов ССНТ, составлена ее математическая модель в виде структурной схемы, приведенной на рис. 2. ССНТ имеет следующие параметры: $J = 0,01 \text{ кгм}^2$ – момент инерции электропривода; $\chi_{уд} = 2000 \text{ Нс}$ – удельный коэффициент демпфирования колебаний в

тросе; $C_{уд} = 80\,000 \text{ Н}$ – удельная жесткость троса; $r = 0,1 \text{ м}$ – радиус приводного шкива электропривода и блоков трособлочной системы ССНТ; $m_n = 80 \text{ кг}$ – масса груза-противовеса; $C_m = 0,05 \text{ Нм / А}$ – коэффициент передачи двигателя по моменту; $K_{дн} = 1 \text{ В/Н}$ – коэффициент передачи датчика натяжения троса; $i = 100$ – передаточное число редуктора.

Рассмотрим длины участков троса СИН: l_1 – между электроприводом и звеном КА и l_2 – между электроприводом и грузом-противовесом. Эти длины определяют интервалы параметров соответствующих участков троса: $[C_1] = C_{уд} / [l_1]$, $[C_2] = C_{уд} / [l_2]$ и $[\chi_1] = \chi_{уд} / [l_1]$, $[\chi_2] = \chi_{уд} / [l_2]$.

В результате преобразования приведенной на рис. 2 структурной схемы ССНТ по-

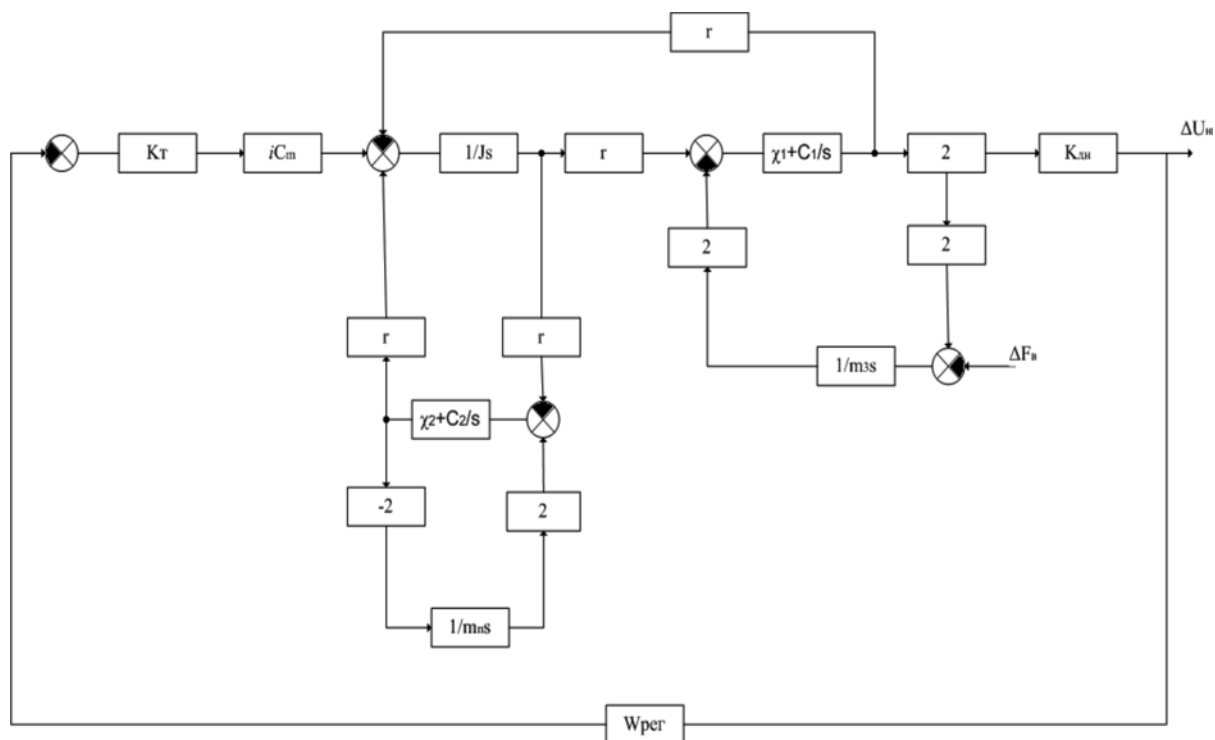


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации натяжения троса

лучен ее характеристический полином

$$P(s) = p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0, \quad (7)$$

где в коэффициенты линейно входят настройки ПИ-регулятора и полилинейно интервальные параметры системы:

$$\begin{aligned} p_0 &= 4m_3 r C_2 C_m i C_1 k k_1; \\ p_1 &= 4m_3 r C_2 C_1 (2rK_{дн} + C_m i k k_2) + \\ &+ 4m_3 r C_m i k (C_2 \chi_1 k_1 + C_1 \chi_2) + \\ &+ 8K_{дн} C_2 C_1 (J + r^2 m_n); \\ p_2 &= 8rK_{дн} m_3 m_n (\chi_1 + \chi_2) + \\ &+ 4m_3 r C_m i k k_2 (C_2 \chi_1 + C_1 \chi_2) + \\ &+ 32K_{дн} J (C_2 \chi_1 + C_1 \chi_2) + \\ &+ 8K_{дн} r^2 (C_2 \chi_1 m_3 + C_1 \chi_2 m_n) + \\ &+ m_3 r C_m i k k_2 (4\chi_1 + C_1 m_n); \\ p_3 &= 2r^2 K_{дн} m_3 m_n (C_1 + C_2) + \\ &+ 8K_{дн} \chi_1 \chi_2 (4J + r^2 m_n + m_3 r^2) + \\ &+ 8K_{дн} J (C_1 m_n + C_2 m_3) + \\ &+ m_3 r C_m i k (4k_2 \chi_1 + k_1 \chi_1 + C_1 m_n k_2); \\ p_4 &= 2r^2 K_{дн} m_3 m_n (C_1 + C_2) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ 8K_{дн} J (m_n \chi_1 + m_3 \chi_2) + \\ &+ 32K_{дн} J (C_2 \chi_1 + C_1 \chi_2) + \\ &+ m_n m_3 r C_m i k k_2; \\ p_5 &= 2K_{дн} m_3 m_n J. \end{aligned}$$

Пусть масса m_3 элемента КА принадлежит диапазону [60; 100] кг. Длины l_1 и l_2 в процессе раскрытия КА принимают значения из интервала [5; 10] м. Тогда на основании правил интервальной арифметики приведем полином (7) к интервальному виду:

$$P(s) = [p_5]s^5 + [p_4]s^4 + [p_3]s^3 + [p_2]s^2 + [p_1]s + [p_0], \quad (8)$$

где $p_5 = [1; 3]$; $p_4 = [624 + 2e^4 k_2; 2528 + 12e^4 k_2]$;

$$p_3 = [112128 + 2e^4 k_1 + 832e^4 k_2; 636180 + 12e^4 k_1 + 4942e^4 k_2];$$

$$p_2 = [4070400 + 832e^4 k_1 + 256e^6 k_2; 30464000 + 4992e^4 k_1 + 1536e^6 k_2];$$

$$p_1 = [58368e^4 + 256e^6 k_1 + 512e^8 k_2; 37888e^4 + 1536e^6 k_1 + 3072e^8 k_2];$$

$$p_0 = [512e^8 k_1; 3072e^8 k_1].$$

Заметим, что интервальные коэффициенты полинома (8) образуют параметрический многогранник, вершины которого определяются крайними значениями коэффициентов полинома.

Параметрический синтез робастного ПИ-регулятора системы стабилизации натяжения троса. На основании полученных условий (2)–(6) проведем параметрический синтез робастного ПИ-регулятора ССНТ. Для этого, приняв $\delta_d = 1,75$, что соответствует сектору $\varphi = \pm 70^\circ$ располо-

жения корней полинома (8), выразим из (6) при $z = 4$ параметр регулятора k_1 через k_2 : $k_1(k_2) = \frac{p_4^2(k_2)}{p_3(k_2)} - 1,75 p_3(k_2) p_5(k_2)$. Далее, подставив $k_1(k_2)$ в (2), при $i = 3$ получим уравнение $\frac{p_2(k_2)}{p_5(k_2)} - 0,465(p_3(k_2) - \overline{p_4(k_2)\eta})(\overline{p_4(k_2)}) = 0$, из которого выразим параметр регулятора k_2 через степень устойчивости η . Используя полученные зависимости в выражениях (3)–(6), сформируем для ССНТ систему неравенств (9), где неизвестным является максимальная степень устойчивости η :

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{p_0(\eta)} \overline{p_3(\eta)} / (\overline{p_1(\eta)} - 3 \overline{p_2(\eta)\eta})(\overline{p_2(\eta)} - 2 \overline{p_3(\eta)\eta}) < 0,465; \\ \overline{p_1(\eta)} \overline{p_4(\eta)} / (\overline{p_2(\eta)} - 2 \overline{p_3(\eta)\eta})(\overline{p_3(\eta)} - \overline{p_4(\eta)\eta}) < 0,465; \\ \overline{p_1(\eta)} - 3 \overline{p_2(\eta)\eta} \geq 0; \\ \overline{p_2(\eta)} - 2 \overline{p_3(\eta)\eta} \geq 0; \\ \overline{p_3(\eta)} - \overline{p_4(\eta)\eta} \geq 0; \\ \overline{p_0(\eta)} - \overline{p_1(\eta)\eta} + 2 \overline{p_2(\eta)} \frac{\eta^2}{3} \geq 0; \\ \overline{p_1^2(\eta)} / \overline{p_0(\eta)p_2(\eta)} \geq 1,75; \\ \overline{p_2^2(\eta)} / \overline{p_1(\eta)p_3(\eta)} \geq 1,75; \\ \overline{p_3^2(\eta)} / \overline{p_2(\eta)p_4(\eta)} \geq 1,75. \end{array} \right. \quad (9)$$

Решая систему (9), находим $\eta = 6,8$, после чего определяем искомые настройки робастного ПИ-регулятора $k_2 = 0,06$, $k_1 = 1$.

Моделирование процессов управления в системе стабилизации натяжения троса. Оценка работоспособности ССНТ с синтезированным регулятором проведена путем моделирования системы в пакете Matlab с помощью приложения Simulink. Моделирование выполнено для сочетаний интервальных параметров ССНТ, соответствующих наихудшему режиму работы: $l_2 > l_1, m_n > m_3$.

Для проверки правильности имитации вертикальным каналом СИН движения элемента КА в условиях невесомости в качестве входного воздействия выбран импульс силы толкателя, приводящего в движение элемент КА (рис. 3 а). Известно, что в результате импульсного воздействия на объект в условиях невесомости последний

разгоняется и начинает двигаться с постоянной скоростью, зависящей от величины импульса. Именно такой характер движения получен на рис. 3 б. Оценить выполнение в ССНТ первого критерия имитации невесомости – сохранение постоянства натяжения троса – можно по графику, показанному на рис. 3 в.

Из рис. 3 видно, что выставленная до начала испытания датчиком на нуль сила натяжения троса совершает в переходном процессе быстрозатухающие колебания с частотой, определяемой жесткостью троса, и в установившемся режиме опять равна нулю. Такое поведение силы натяжения троса свидетельствует о соответствии характера движения элементов КА на СИН их движению в условиях невесомости.

Моделирование процессов управления в ССНТ в других режимах работы (при других сочетаниях интервальных параметров)

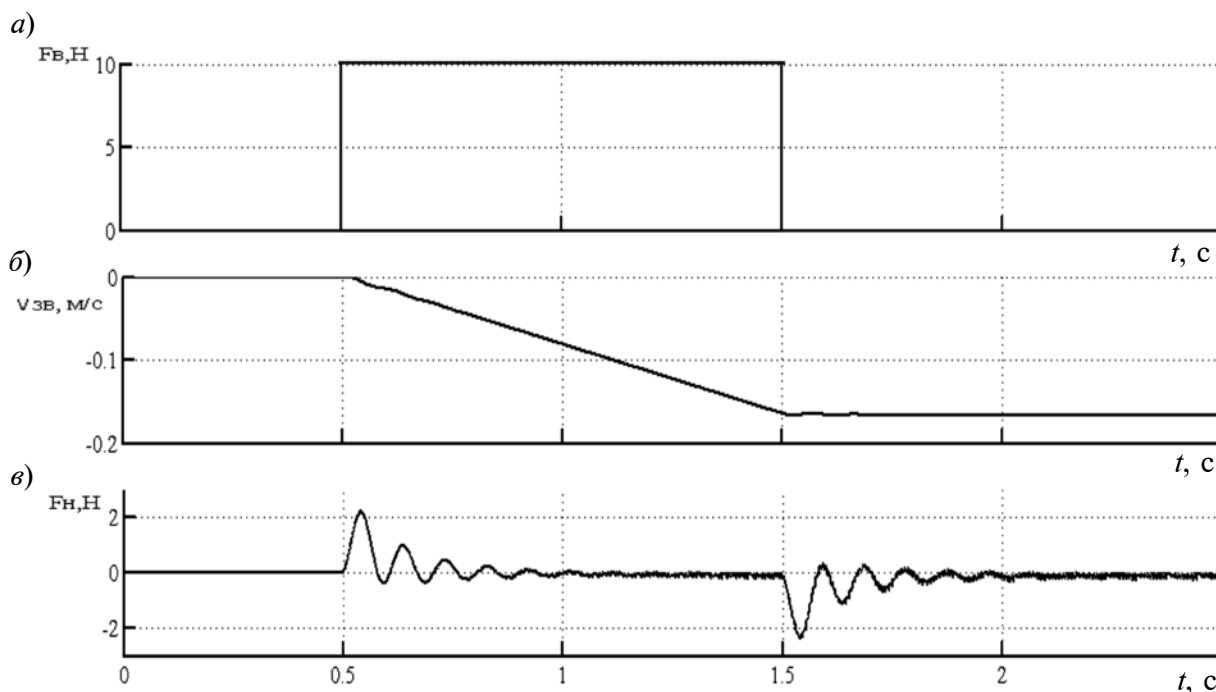


Рис. 3. Переходные процессы:

a – силы толкателя; b – скорости вертикального перемещения элемента КА; v – силы натяжения троса

показало, что их качество мало отличается от приведенного на рис. 3, что позволяет сделать вывод о наличии у ССНТ робастных свойств.

В статье разработана структура робастной системы стабилизации натяжения троса, позволяющая в наземных условиях на специальном стенде имитировать невесомость при испытаниях космического аппарата. Для расчета параметров используемого в системе ПИ-регулятора применен коэффициентный метод и критерий мак-

симального быстродействия. Эффективность работы спроектированной системы подтверждена графиками переходных процессов.

Проведенные исследования выявили ряд новых задач, решение которых позволит улучшить качество работы робастной системы стабилизации натяжения троса. В частности, представляется целесообразным учитывать при проектировании системы различные сопутствующие нелинейности (сухое трение в блоках трособлочной системы, люфты в электроприводах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадутов О.С., Мельников Ю.С., Гайворонский С.А., Новокшенов С.В. Синтез динамических регуляторов интервальных автоматических систем стенда имитации невесомости // Информационные системы и технологии. Доклад Междунар. конф. Новосибирск, 2000. С. 371–377.
2. Волков А.Н., Загашвили Ю.В. Метод синтеза систем автоматического управления с максимальной степенью устойчивости при наличии ограничений // Известия РАН. Теория и системы управления. 1997. № 3. С. 12–19.
3. Татаринев А.В., Цирлин А.М. Задачи математического программирования, содержащие комплексные переменные, и предельная степень устойчивости линейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 28–33.
4. Keel L.H., Bhattacharyya S.P. Robust stability and performance with fixed-order controllers // Automatica. 1999. No. 35. Pp. 1717–1724.
5. Петров Б.Н., Соколов Н.И., Липатов А.В. и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженер-

ные методы анализа и синтеза. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.

6. **Гайворонский С.А., Езангина Т.А.** Настройка ПИД-регулятора для максимизации степени устойчивости интервальной системы // Автоматизация процессов управления. 2013. № 1(31).

С. 86–91.

7. **Гайворонский С.А., Езангина Т.А.** Параметрический синтез линейного регулятора для интервального объекта управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2013. № 9(105). С. 5–10.

REFERENCES

1. **Vadutov O.S., Melnikov Yu.S., Gayvoronskiy S.A., Novokshonov S.V.** Sintez dinamicheskikh regulyatorov intervalnykh avtomaticheskikh sistem stenda imitatsii nevesomosti, *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii. Doklad mezhdunarodnoy konferentsii*, Novosibirsk, 2000, Pp. 371–377. (rus)

2. **Volkov A.N., Zagashvili Yu.V.** Metod sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya s maksimalnoy stepenyu ustoychivosti pri nalichii ograniчений, *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1997, No. 3. Pp. 12–19. (rus)

3. **Tatarinov A.V., Tsirlin A.M.** Zadachi matematicheskogo programmirovaniya, sodержashchiye kompleksnyye peremennyye, i predelnaya stepen ustoychivosti lineynykh dinamicheskikh system, *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1995, No. 1, Pp. 28–33. (rus)

4. **Keel L.H., Bhattacharyya S.P.** Robust stability and performance with fixed-order controllers, *Automatica*, 1999, No. 35, Pp. 1717–1724.

5. **Petrov B.N., Sokolov N.I., Lipatov A.V. i dr.** *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya ob'yektami s peremennymi parametrami: Inzhenernyye metody analiza i sinteza*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (rus)

6. **Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A.** Nastroyka PID-regulyatora dlya maksimizatsii stepeni ustoychivosti intervalnoy sistemy, *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*. 2013. No. 1(31). Pp. 86–91. (rus)

7. **Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A.** Parametricheskyy sintez lineynogo regulyatora dlya intervalnogo ob'yekta upravleniya, *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravleniye*. 2013, No. 9(105). Pp. 5–10. (rus)

ГАЙВОРОНСКИЙ Сергей Анатольевич — заместитель директора по учебной работе Института кибернетики Национального исследовательского томского политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: saga@tpu.ru

GAYVORONSKIY, Sergey A. *National Research Tomsk Polytechnic University.*

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: saga@tpu.ru

ЕЗАНГИНА Татьяна Александровна — аспирант кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики Национального исследовательского томского политехнического университета.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: eza-tanya@yandex.ru

EZANGINA, Tatiana A. *National Research Tomsk Polytechnic University.*

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: eza-tanya@yandex.ru

УДК 531.383-11:681.7

С.Г. Николаев, Ю.В. Ившина

КАЛИБРОВКА БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПО ВЫХОДНЫМ СИГНАЛАМ МОДЕЛИ ОШИБОК

S.G. Nikolaev, Yu.V. Ivshina

CALIBRATION OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS USING OUTPUT SIGNALS OF ERROR MODEL

Рассмотрена проблема повышения точности калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Калибровка выполнена на наклонно-поворотном стенде. Исследован способ определения погрешностей датчиков БИНС (гироскопов и акселерометров) по выходным сигналам ее модели ошибок. Входными сигналами модели ошибок БИНС являются погрешности гироскопов и акселерометров. Решается обратная задача. Погрешности гироскопов и акселерометров определяются по ошибкам БИНС, определенным экспериментально в процессе калибровки. Предложены алгоритмы вычисления погрешностей датчиков, проанализирована их эффективность. Разработана методика калибровки датчиков по выходным сигналам модели ошибок с коррекцией БИНС по сигналам стенда.

БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА; КАЛИБРОВКА; ГИРОСКОПЫ; АКСЕЛЕРОМЕТРЫ.

The problem of increasing the accuracy of the calibration of Strapdown Inertial Navigation System (SINS) is considered. Calibration is performed on precision motion simulator. Method of determining sensor errors (gyroscopes and accelerometers) using output signals of error model of SINS is investigated. Entrance signals of errors model of SINS are errors gyroscopes and accelerometers. The method is based on solving the inverse problem, it is determination of errors gyroscopes and accelerometers using output signals of error model that are determined experimentally during calibration. The algorithms are proposed for sensor errors, the algorithms efficiency is analyzed. Procedure for calibrating the sensors using output signals of error model of SINS is developed, it is with correction system by precision motion simulators signals.

STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM; CALIBRATION; GYROSCOPE; ACCELEROMETER.

Точность работы бесплатформенных инерциальных навигационных систем зависит от точностных характеристик и качества выполнения калибровки акселерометров и гироскопов. Целью калибровки является определение их систематических погрешностей, которые затем учитываются в алгоритмах бортового вычислителя БИНС.

Калибровка выполняется на специальных наклонно-поворотных (калибровочных) стендах (рис. 1).

Стенд ориентируется относительно плоскостей горизонта и меридиана, может вращаться и разворачиваться на постоянные углы. Ориентация стенда, угловые скорости вращения и углы измеряются



Рис. 1. Наклонно-поворотный стенд
ACUTRONIC

с высокой точностью. Погрешности акселерометров и гироскопов называются *калибровочными коэффициентами*. Калибровочные коэффициенты после окончания калибровки «зашиваются» в бортовой вычислитель БИНС для компенсации систематических погрешностей. В качестве калибровочных сигналов для акселерометров и гироскопов используется ускорение силы тяжести g и проекции угловой скорости суточного вращения Земли.

Основной недостаток традиционного способа калибровки – высокий уровень шумов (непараметрических флуктуационных погрешностей) в сигналах датчиков.

Разрешение этого противоречия возможно с помощью калибровки по значительно менее зашумленным выходным сигналам модели ошибок БИНС [1, 2]. При данном способе калибровка проводится в два этапа. На первом этапе решается обратная задача определения входных сигналов модели ошибок БИНС, которые являются функциями систематических ошибок акселерометров и гироскопов. На втором этапе по полученным входным сигналам модели ошибок определяются калибровочные коэффициенты.

Постановка задачи. Необходимо разработать алгоритмы вычисления калибровочных коэффициентов по выходным сигналам модели ошибок БИНС, проанализировать эффективность алгоритмов,

оценить точность идентификации входных сигналов модели ошибок и разработать методику двухэтапной калибровки БИНС с коррекцией от наклонно-поворотного стенда.

Способ калибровки двухканальной БИНС по выходным сигналам модели ошибок. Структурная схема калибровки БИНС представлена на рис. 2. В схеме используются следующие обозначения: вектор ошибок БИНС $X(k) = (\delta V_e, \delta \gamma, \delta V_n, \delta v, \delta r_n, \delta r_e, \delta \psi)^T$ для k -й ориентации стенда; $X'(k)$ – производная вектора ошибок для k -й ориентации стенда; ψ_c, v_c, γ_c – углы разворота стенда по углам курса, тангажа и крена соответственно; ψ_u, v_u, γ_u – углы курса, тангажа и крена на выходе БИНС; $\delta \psi = \psi_u - \psi_c, \delta v = v_u - v_c, \delta \gamma = \gamma_u - \gamma_c$ – ошибки определения углов курса, тангажа и крена; $\delta V_e, \delta V_n$ – ошибки определения восточной и северной составляющих скоростей; $\delta r_n, \delta r_e$ – ошибки определения координат в северном и восточном направлениях; $F(k)$ – вектор входных сигналов модели ошибок для k -й ориентации стенда; Z – вектор калибровочных коэффициентов, определенных в процессе калибровки. ПЭВМ1 управляет движением стенда, а в ПЭВМ2 реализуются алгоритмы идентификации входных сигналов модели ошибок БИНС и алгоритмы вычисления калибровочных коэффициентов.

Идентификация входных сигналов моде-

ли ошибок БИНС. Модель ошибок БИНС представляется в виде дифференциального матричного уравнения с постоянными ко-

эффициентами [3]:

$$\dot{X} = A \cdot X + F, \quad (1)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -g & 2U_{up} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/a & 0 & 0 & -U_{up} & -U_{up}/a & 0 & 0 \\ -2U_{up} & 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & U_{up} & -1/a & 0 & 0 & -U_{up}/a & -U_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_n & U_n/a & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$X = (\delta V_e, \alpha_n, \delta V_n, \alpha_e, \delta r_n, \delta r_e, \beta)^T, F = (\delta f_e, \delta \omega_n, \delta f_n, \delta \omega_e, 0, 0, \delta \omega_{up})^T,$$

X – вектор ошибок БИНС; F – вектор входных сигналов модели ошибок БИНС; δV_i ($i = e, n$) – ошибки определения восточной и северной составляющих линейной скорости; α_i ($i = e, n$) – ошибки определения углов отклонения квазиприборного трехгранника от географической вертикали; β – ошибка определения азимутального направления; δr_i ($i = e, n$) – ошибки определения координат; g – ускорение силы тяжести; a – радиус Земли; $U_n = \Omega \cos \varphi$, $U_{up} = \Omega \sin \varphi$ – горизонтальная и вертикальная составляющие угловой скорости суточного вращения Земли Ω ; δf_i ($i = e, n$) – сумма проекций векторов систематических

погрешностей акселерометров на оси Oe и On ; $\delta \omega_i$ ($i = e, n, u_p$) – сумма проекций векторов погрешностей гироскопов на оси Oe , On и OUp .

Структуру моделей инструментальных ошибок датчиков БИНС примем в стандартном виде. Погрешности датчиков включают смещения нулей, ошибки масштабных коэффициентов, углы перекосов осей чувствительности и непараметрические флуктуационные погрешности:

$$\begin{pmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{nx} \\ f_{ny} \\ f_{nz} \end{pmatrix} + N_a \begin{pmatrix} f_{kx} \\ f_{ky} \\ f_{kz} \end{pmatrix} + m_a, \quad (2)$$

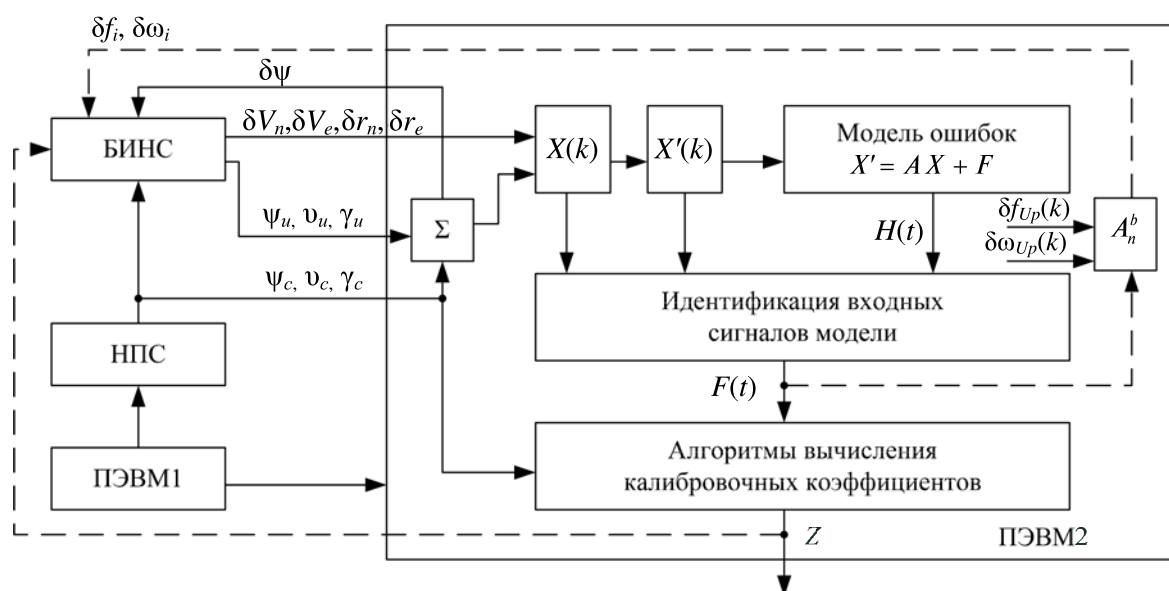


Рис. 2. Схема калибровки двухканальной БИНС:
НПС – наклонно-поворотный стенд; ПЭВМ 1, 2 – персональные компьютеры

$$N_a = \begin{pmatrix} \delta k_{ax} & \mu_{xy} & -\mu_{xz} \\ -\mu_{yx} & \delta k_{ay} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & -\mu_{zy} & \delta k_{az} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \delta \omega_x \\ \delta \omega_y \\ \delta \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{mx} \\ \omega_{my} \\ \omega_{mz} \end{pmatrix} + N_d \begin{pmatrix} \omega_{kx} \\ \omega_{ky} \\ \omega_{kz} \end{pmatrix} + m_d, \quad (3)$$

$$N_d = \begin{pmatrix} \delta k_{dx} & v_{xy} & -v_{xz} \\ -v_{yx} & \delta k_{dy} & v_{yz} \\ v_{zx} & -v_{zy} & \delta k_{dz} \end{pmatrix},$$

где f_{ni} , ω_{ni} , $i = x, y, z$ — смещения нулей акселерометров и гироскопов; δk_{li} , $i = x, y, z$; $l = a, d$ — ошибки масштабных коэффициентов акселерометров и гироскопов; μ_{ij} , v_{ij} , $i \neq j$ — углы перекосов осей чувствительности акселерометров и гироскопов относительно связанной системы координат $Oxyz$, ориентированной по посадочным плоскостям БИНС; m_a , m_d — непараметрические флуктуационные погрешности акселерометров и гироскопов; f_{ki} , ω_{ki} , $i = x, y, z$ — проекции калибровочных сигналов на оси чувствительности акселерометров и гироскопов.

Запуску БИНС в рабочий режим предшествует выставка, во время которой определяется начальное значение вектора состояний, а в нашем случае — начальное состояние вектора ошибок $X(0)$. Выставку выполним по показаниям стенда, который является образцовым измерительным средством.

Следовательно, можно принять $X(0) = 0$.

Если определена фундаментальная матрица решений $H(t)$, то, следуя [4], решение системы (1) для принятых начальных условий получим в виде:

$$X(t) = H(t) \int_0^t H^{-1}(t) F dt. \quad (4)$$

Решение однородной системы $\dot{X} = A \cdot X$ равно:

$$X(t) = H(t)C, \quad (5)$$

где постоянный вектор C определяется начальными условиями.

Фундаментальная матрица решений $H(t)$ строится по собственным векторам, соот-

ветствующим собственным значениям матрицы A . Представим, что вектор $C \neq \text{const}$. Тогда вектор $X(t)$ с учетом зависимостей (4) и (5) примем равным:

$$X(t) = H(t)C(t), \quad (6)$$

$$C(t) = \int_0^t H^{-1}(t) F dt. \quad (7)$$

Возьмем производную от векторной функции (6):

$$\dot{X}(t) = \dot{H}(t)C(t) + H(t)\dot{C}(t). \quad (8)$$

Учитывая выражение (8) и свойства фундаментальной матрицы решений $H(t)$, матричное уравнение (8) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AH(t)C(t) + H(t)\dot{C}(t) = \\ &= AX(t) + H(t)\dot{C}(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая уравнения (1) и (9), получим выражение для определения F :

$$F = H(t)\dot{C}(t). \quad (10)$$

Используем векторные уравнения (4) и (10) для построения алгоритмов вычисления F . Для конкретных значений моментов времени $t = t_i$ (4) можно представить в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$H(t_i) \int_0^{t_i} H^{-1}(t) F dt = \tilde{X}(t_i), \quad (11)$$

где $\tilde{X}(t_i)$ — измеренный вектор ошибок БИНС в момент времени t_i .

В случае построения алгоритмов по уравнению (8) необходимо $\dot{C}(t)$ выразить через параметры, которые можно определить во время калибровки. В качестве таких параметров могут использоваться измеренный вектор ошибок $\tilde{X}(t)$ и его производная $\dot{\tilde{X}}(t)$, полученная численным дифференцированием $\tilde{X}(t)$. Чтобы уменьшить влияние погрешностей исходных данных предварительно перед численным дифференцированием компоненты вектора $X(t)$ аппроксимируются полиномом, а затем проводится численное дифференцирование.

Используя (6), (8) и (10), получим еще два варианта алгоритмов для вычисления F :

$$F = \dot{\tilde{X}}(t_i) - \dot{H}(t_i)H^{-1}(t_i)\tilde{X}(t_i), \quad (12)$$

$$(I + \dot{H}(t_i) \int_0^{t_i} H^{-1}(t)dt)F = \dot{\tilde{X}}(t_i), \quad (13)$$

где I – единичная матрица.

Выражения (12) и (13), записанные для конкретных моментов времени t_i , являются системами линейных алгебраических уравнений.

Существуют разные способы построения матрицы $H(t)$. Будем определять фундаментальную матрицу решений $H(t)$ по алгоритму:

$$H(t) = V(e^{Jt}),$$

где V – матрица собственных векторов матрицы A ; (e^{Jt}) – диагональная матрица с элементами $e^{\lambda_i t}$; λ_i – собственные значения матрицы A .

Оценим эффективность вычисления вектора F по измеренному вектору ошибок $\tilde{X}(t)$. Для этого запишем систему (11) в виде:

$$M_1(t_i)F = \tilde{X}(t_i), \quad (14)$$

где матрица $M_1(t_i) = H(t_i) \int_0^{t_i} H^{-1}(t)dt$.

Вычислим определитель матрицы $M_1(t_i)$. График значений определителя $\det(M_1(t_i))$ представлен на рис. 3. Из графика следует, что имеются моменты времени, когда

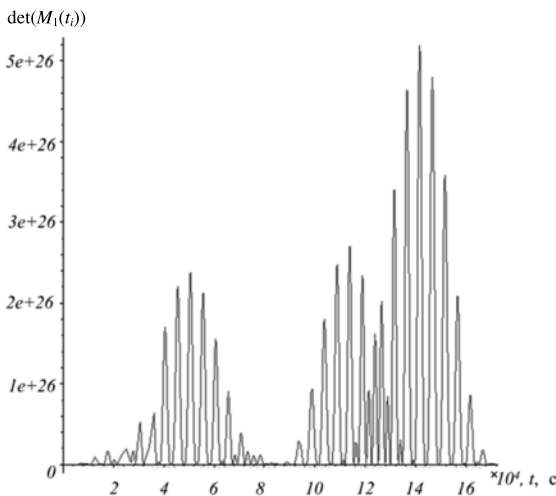


Рис. 3. График значений определителя $\det(M_1(t_i))$

определитель становится равным нулю. Это означает, что система (14) плохо обусловлена, и использовать алгоритм (11) для расчета F ввиду больших вычислительных ошибок нецелесообразно.

Аналогичным образом оценим эффективность вычисления вектора F по производной вектора ошибок $\dot{\tilde{X}}(t)$. Для этого запишем систему (13) в виде:

$$M_2(t_i)F = \dot{\tilde{X}}(t_i), \quad (15)$$

где матрица $M_2(t_i) = I + \dot{H}(t_i) \int_0^{t_i} H^{-1}(t)dt$.

Определитель матрицы $M_2(t_i)$, вычисленный для различных моментов времени калибровки t_i , равен единице. Это означает, что алгоритм (13) может быть использован для вычисления вектора F . Запишем систему (12) в виде:

$$I \cdot F = \dot{\tilde{X}}(t_i) - \dot{H}(t_i)H^{-1}(t_i)\tilde{X}(t_i), \quad (16)$$

где I – единичная матрица.

Система (16) хорошо обусловлена. Прямое введение компонент F в алгоритмы навигационной системы невозможно. Это можно сделать только с помощью введения поправок $\delta f_{x,y,z}$ и $\delta \omega_{x,y,z}$ в выходные сигналы акселерометров и гироскопов, которые определяются через компоненты вектора F :

$$\begin{pmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{pmatrix} = A_n^b \begin{pmatrix} \delta f_n \\ \delta f_{Up} \\ \delta f_e \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \delta \omega_x \\ \delta \omega_y \\ \delta \omega_z \end{pmatrix} = A_n^b \begin{pmatrix} \delta \omega_n \\ \delta \omega_{Up} \\ \delta \omega_e \end{pmatrix},$$

где A_n^b – матрица направляющих косинусов перехода от опорной системы координат $OnUp_e$ к связанной системе координат $OXYZ$. Вектор погрешностей гироскопов $(\delta \omega_x, \delta \omega_y, \delta \omega_z)^T$ определяется однозначно по компонентам вектора F . Для определения вектора погрешностей $(\delta f_x, \delta f_y, \delta f_z)^T$ не хватает компоненты δf_{Up} ввиду отсутствия в БИНС вертикального канала. Недостающая компонента δf_{Up} определяется с помощью матрицы A_n^b и разностей выходных сигналов акселерометров и калибровочного сигнала g .

Матрица A имеет одно собственное значение, равное нулю ($\lambda_7 = 0$). Это приводит к неустойчивости модели ошибок по углу

азимута и вызывает существенные погрешности определения вектора F . Проблему можно решить с помощью введения корректирующего сигнала от калибровочного стенда. Если в алгоритмах БИНС в каждый расчетный момент времени вычисленному значению угла азимута присваивать значение азимутального угла, заданного стендом, то можно осуществить редукцию модели ошибок навигационной системы, уменьшив ее порядок на единицу. Рассмотрим способ такой коррекции более подробно.

В этом случае матричное уравнение (1) будет иметь вид:

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + F_1, \quad (17)$$

где A_1 – матрица, полученная из матрицы A вычеркиванием последней строки и последнего столбца; $X_1 = (\delta V_e, \delta \alpha_n, \delta V_n, \alpha_e, \delta r_n, \delta r_e)^T$, $F_1 = (\delta f_e, \delta \omega_n, \delta f_n, \delta \omega_e, 0, 0)^T$. Матрица A_1 не имеет нулевых собственных значений.

Фундаментальную матрицу решений $H_1(t)$ системы (17) находим по приведенному выше алгоритму.

Оценим эффективность вычисления вектора F_1 по вычисленной производной вектора ошибок $\dot{X}_1(t)$. Для этого запишем систему (13) в виде:

$$M_3(t_i) F_1 = \dot{X}_1(t_i), \quad (18)$$

где матрица $M_3(t_i) = I + \dot{H}_1(t_i) \int_0^{t_i} H_1^{-1}(t) dt$.

Определитель матрицы $M_3(t_i)$, вычисленный для различных моментов времени калибровки t_i , равен единице. Окончательно получим два алгоритма для определения компонент вектора F_1 :

$$F_1 = \dot{X}_1(t_i) - \dot{H}_1(t_i) H_1^{-1}(t_i) \tilde{X}_1(t_i), \quad (19)$$

$$F_1 = M_3^{-1}(t_i) \dot{X}_1(t_i). \quad (20)$$

Численный эксперимент определения компонент векторов F и F_1 . Проведем численный эксперимент определения компонент векторов F и F_1 . Пусть БИНС установлена на наклонно-поворотном стенде следующим образом. Система координат $OXYZ$, связанная с осями чувствительности акселерометров и гироскопов БИНС, ориентирована относительно системы $OnUpe$

так, что ось OX совпадает с осью On , оси OY и OZ направлены по осям Oe и OUp соответственно. Сначала определим по алгоритму (12) компоненты вектора F .

Численные значения вектора $F = (\delta f_e, \delta \omega_n, \delta f_n, \delta \omega_e, 0, 0, \delta \omega_{Up})^T$ примем равными: $\delta f_e = -0,076g$, $\delta f_n = -0,062g$, $\delta \omega_n = 0,0021^\circ/\text{ч}$, $\delta \omega_{Up} = 0,0092^\circ/\text{ч}$, $\delta \omega_e = 0,0052^\circ/\text{ч}$. Составляющие вектора $\tilde{X}(t)$ определим численным решением системы (1). Вектор $\tilde{X}(t)$ получим численным дифференцированием $\tilde{X}(t)$. Время интегрирования системы (1) примем равным периоду Шулера ($\sim 1,5$ ч). Для определения компонент вектора F используем метод простых итераций. Суть метода состоит в следующем. На первом шаге итераций для начальных условий $X(0)$ по алгоритму (12) определяем первую группу значений компонент вектора $F(k) = (\delta f_e(k), \delta \omega_n(k), \delta f_n(k), \delta \omega_e(k), 0, 0, \delta \omega_{Up}(k))^T$, где $k = 1, \dots, n$ – число итераций. По найденным компонентам вектора $F(1)$ определяются погрешности акселерометров и гироскопов:

$$\begin{pmatrix} \delta f_x(1) \\ \delta f_y(1) \\ \delta f_z(1) \end{pmatrix} = A_n^b \begin{pmatrix} \delta f_n(1) \\ \delta f_{Up}(1) \\ \delta f_e(1) \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} \delta \omega_x(1) \\ \delta \omega_y(1) \\ \delta \omega_z(1) \end{pmatrix} = A_n^b \begin{pmatrix} \delta \omega_n(1) \\ \delta \omega_{Up}(1) \\ \delta \omega_e(1) \end{pmatrix}.$$

Значения $\delta f_{x,y,z}$ и $\delta \omega_{x,y,z}$ заводим в бортовой вычислитель БИНС в качестве сигналов коррекции к показаниям акселерометров и гироскопов. Затем цикл вычислений повторяется. На рис. 4–6 приведены графики относительных погрешностей компонент вектора F , вычисленных на i -й итерации (по оси абсцисс приводятся номера итераций). Из графиков следует, что компоненты вектора F δf_n и δf_e определяются с высокой точностью уже на третьей итерации. Компоненты $\delta \omega_n$, $\delta \omega_{Up}$ и $\delta \omega_e$ (рис. 4) вычисляются с недопустимыми погрешностями. Эти погрешности обусловлены ростом с течением времени ошибки по углу азимутального направления.

Оценим относительные погрешности компонент вектора F , вычисленные по ал-

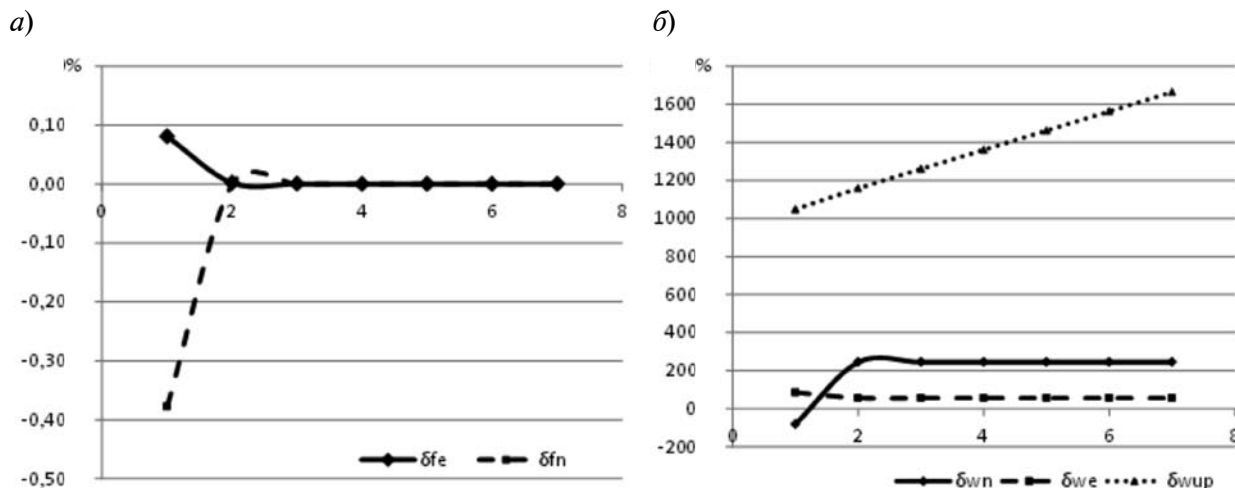


Рис. 4. Графики относительных ошибок компонент F

горитму (13), посредством использования только вектора $\tilde{X}(t)$.

Из графиков рис. 5 следует, что и в этом случае компоненты вектора F вычисляются с недопустимыми погрешностями, хотя ошибка $\delta\omega_{up}$ уже не растет с течением времени.

Делаем вывод, что алгоритмы, построенные по неустойчивой исходной системе дифференциальных уравнений (1), не могут обеспечить точное вычисление всех компонент входных сигналов модели ошибок БИНС.

Проведем численный эксперимент, с помощью которого попытаемся оценить возможность построения устойчивых ал-

горитмов определения входных сигналов модели ошибок БИНС с использованием коррекции от калибровочного стенда. Рассмотрим вариант коррекции с редукцией модели ошибок БИНС $\dot{X}_1 = A_1 X_1 + F_1$.

Исходные данные и ориентация стенда остаются прежними.

На рис. 6 приведены графики относительных погрешностей компонент вектора $F_1 = (\delta f_e, \delta\omega_n, \delta f_n, \delta\omega_e, 0, 0)^T$, вычисленных на i -й итерации.

Из них следует, что все компоненты вектора F_1 определяются с высокой точностью уже на третьей итерации. Используя компоненты $\delta f_e, \delta\omega_n, \delta f_n, \delta\omega_e$ и дополнительно вычисленные компоненты δf_{up} и $\delta\omega_{up}$, вы-

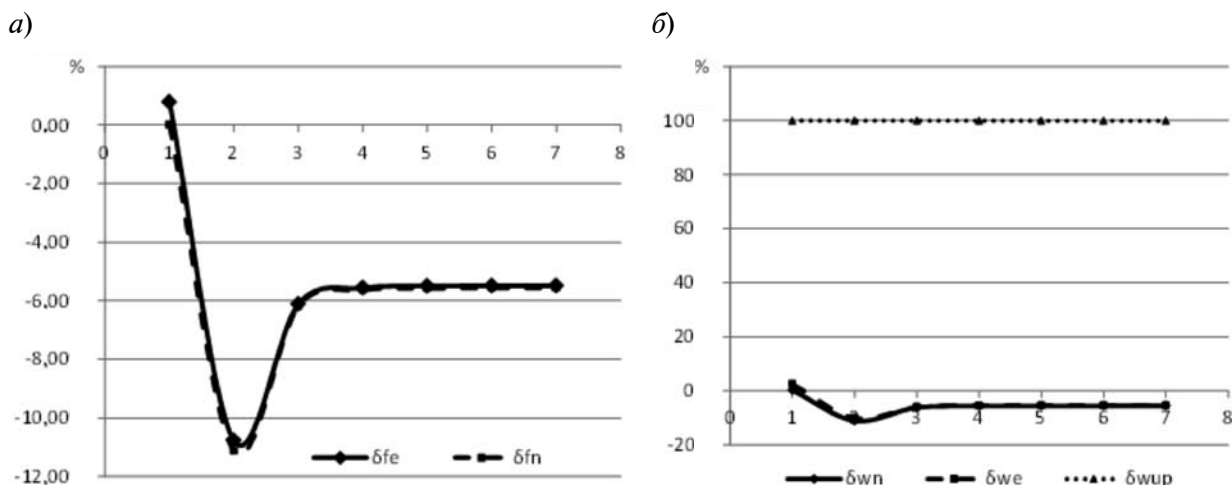


Рис. 5. Графики относительных ошибок компонент F по $\dot{X}(t)$

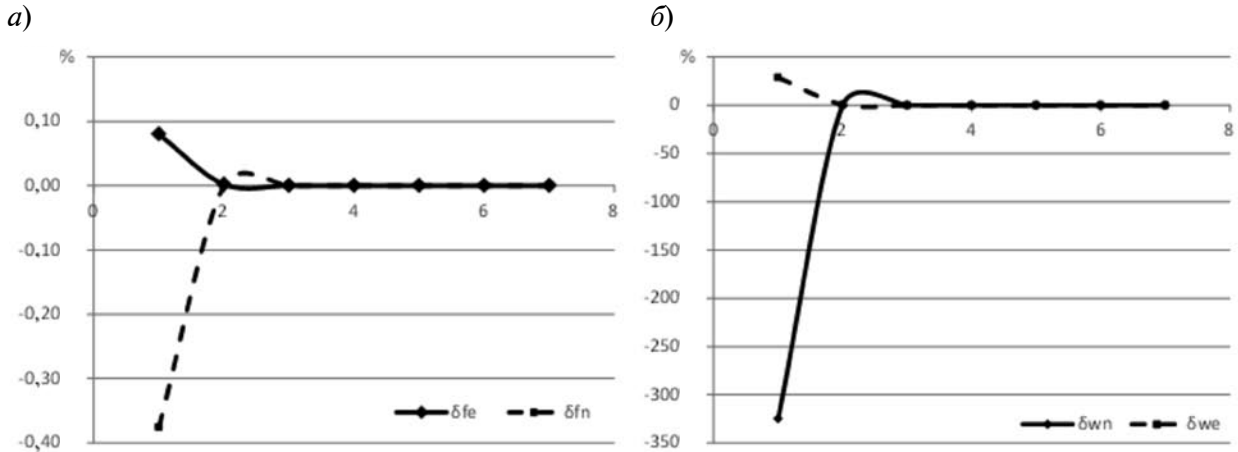


Рис. 6. График относительных ошибок компонент F_1

числа погрешности акселерометров $\delta f_i(k)$ ($I = x, y, z$) и гироскопов $\delta \omega_i(k)$ ($I = x, y, z$) для выбранных ориентаций калибровочного стенда. На этом первый этап калибровки заканчивается.

Определение калибровочных коэффициентов БИНС. На втором этапе вычисляются калибровочные коэффициенты акселерометров и гироскопов. Можно использовать традиционные методики расчетов. Отличия заключаются в том, что вместо показаний датчиков используются ошибки инструментальных погрешностей $\delta f_i(k)$ и $\delta \omega_i(k)$. Для определения калибровочных коэффициентов блока акселерометров и гироскопов применим методику скалярного способа калибровки. Калибровочные соотношения скалярного способа получаются с помощью скалярного произведения векторов калибровочного сигнала и показаний датчика. В нашем случае будем использовать скалярное произведение векторов калибровочных сигналов и векторов инструментальных погрешностей акселерометров и гироскопов.

Перейдем к безразмерным моделям ошибок акселерометров и гироскопов [5]. Для этого необходимо разделить левые и правые части уравнений (2) и (3) на скаляры g_0 и Ω_0 , являющиеся модулями векторов ускорения силы тяжести и угловой скорости суточного вращения Земли:

$$\frac{\delta f_i(k)}{g_0} = N_a n_a(k) + g_0^{-1} C_a + g_0^{-1} m_a(k), \quad (22)$$

$$\frac{\delta \omega_i(k)}{\Omega_0} = N_d n_d(k) + \Omega_0^{-1} C_d + \Omega_0^{-1} m_d(k), \quad (23)$$

где k – номер итерации, δf_i и $\delta \omega_i$ – ошибки гироскопов и акселерометров.

$$n_a(k) = g_0^{-1} \begin{pmatrix} f_{kx}(k) \\ f_{ky}(k) \\ f_{kz}(k) \end{pmatrix}, \quad n_d(k) = \Omega_0^{-1} \begin{pmatrix} \omega_{kx}(k) \\ \omega_{ky}(k) \\ \omega_{kz}(k) \end{pmatrix},$$

$$C_a = \begin{pmatrix} f_{nx} \\ f_{ny} \\ f_{nz} \end{pmatrix}, \quad C_d = \begin{pmatrix} \omega_{nx} \\ \omega_{ny} \\ \omega_{nz} \end{pmatrix}.$$

В виду того, что в каждой ориентации калибровочного стенда проводились процедуры осреднения показаний датчиков, безразмерными векторами шумов $g_0^{-1} m_a(k)$ и $\Omega_0^{-1} m_d(k)$ будем пренебрегать. Основные калибровочные соотношения для вычисления калибровочных коэффициентов получим, применив к векторным зависимостям (22) и (23) операцию скалярного умножения векторов калибровочных сигналов и векторов относительных погрешностей датчиков [6]:

$$\begin{aligned} n_a^T(k) \frac{\delta f_i(k)}{g_0} &= \\ &= n_a^T(k) N_a n_a(k) + g_0^{-1} n_a^T(k) C_a, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} n_d^T(k) \frac{\delta \omega_i(k)}{\Omega_0} &= \\ &= n_d^T(k) N_d n_d(k) + \Omega_0^{-1} n_d^T(k) C_d. \end{aligned} \quad (25)$$

Общее количество калибровочных коэффициентов датчиков БИНС для стандартных моделей ошибок акселерометров и гироскопов равно 24. Для одной ориентации стенда по скалярным уравнениям (24) и (25) получаем одну зависимость для определения калибровочных коэффициентов акселерометров и одну зависимость для определения калибровочных коэффициентов гироскопов. Выберем в качестве плоскости калибровки, в которой будут располагаться оси чувствительности акселерометров и гироскопов, плоскость меридиана nUp . С этой плоскостью будем последовательно совмещать плоскости осей чувствительности датчиков xu , xz и yz . Оси чувствительности акселерометров и гироскопов будем располагать под углом 45° к осям On и OUp , что позволит использовать одни и те же ориентации для определения калибровочных коэффициентов акселерометров и гироскопов. Введем обозначения для значений скалярных произведений векторов калибровочных сигналов и векторов инструментальных погрешностей акселерометров и гироскопов в ориентации k :

$$S_a(k) = n_a^T(k) \cdot \frac{\delta f_i(k)}{g_0}, \quad (27)$$

$$S_d(k) = n_d^T(k) \cdot \frac{\delta \omega_i(k)}{\Omega_0}.$$

Используя калибровочные соотношения (24)–(26), получим выражения для определения калибровочных коэффициентов (ошибок масштабных коэффициентов, смещений нуля и углов «взаимных» перекосов осей чувствительности акселерометров и гироскопов):

$$\delta k_{ax} = \frac{1}{4} \left(\sum_{1-4} S_a(k) - \sum_{5-8} S_a(k) + \sum_{9-12} S_a(k) \right);$$

$$\delta k_{ay} = \frac{1}{4} \left(\sum_{1-4} S_a(k) + \sum_{5-8} S_a(k) - \sum_{9-12} S_a(k) \right);$$

$$\delta k_{az} = \frac{1}{4} \left(-\sum_{1-4} S_a(k) + \sum_{5-8} S_a(k) + \sum_{9-12} S_a(k) \right);$$

$$\frac{f_{nx}}{g_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\sum_{3,4} S_a(k) - \sum_{1,2} S_a(k) \right);$$

$$\frac{f_{ny}}{g_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\sum_{2,3} S_a(k) - \sum_{1,4} S_a(k) \right);$$

$$\frac{f_{nz}}{g_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\sum_{7,8} S_a(k) - \sum_{5,6} S_a(k) \right);$$

$$\Delta_{axy} = \mu_{xy} - \mu_{yx} = \frac{1}{2} \left(\sum_{1,3} S_a(k) - \sum_{2,4} S_a(k) \right);$$

$$\Delta_{ayz} = \mu_{yz} - \mu_{zy} = \frac{1}{2} \left(\sum_{5,7} S_a(k) - \sum_{6,8} S_a(k) \right);$$

$$\Delta_{axz} = \mu_{xz} - \mu_{zx} = \frac{1}{2} \left(\sum_{9,11} S_a(k) - \sum_{10,12} S_a(k) \right);$$

$$\delta k_{dx} = \frac{1}{4} \left(\sum_{1-4} S_d(k) - \sum_{5-8} S_d(k) + \sum_{9-12} S_d(k) \right);$$

$$\delta k_{dy} = \frac{1}{4} \left(\sum_{1-4} S_d(k) + \sum_{5-8} S_d(k) - \sum_{9-12} S_d(k) \right);$$

$$\delta k_{dz} = \frac{1}{4} \left(-\sum_{1-4} S_d(k) + \sum_{5-8} S_d(k) + \sum_{9-12} S_d(k) \right);$$

$$\frac{\omega_{nx}}{\Omega_0} = -\frac{1}{2\sqrt{2}(n_{d_1} + n_{d_2})} \left(\frac{n_{d_1}}{n_{d_2}} \left(\sum_{3,4,5,6} S_d(k) - \sum_{1,2,7,8} S_d(k) \right) + \sum_{11,12} S_d(k) - \sum_{9,10} S_d(k) \right);$$

$$\frac{\omega_{ny}}{\Omega_0} = -\frac{1}{2\sqrt{2}(n_{d_1} + n_{d_2})} \left(\frac{n_{d_2}}{n_{d_1}} \left(\sum_{1,2,11,12} S_d(k) - \sum_{3,4,9,10} S_d(k) \right) + \sum_{5,6} S_d(k) - \sum_{7,8} S_d(k) \right);$$

$$\frac{\omega_{nz}}{\Omega_0} = -\frac{1}{2\sqrt{2}(n_{d_1} + n_{d_2})} \times \left(\sum_{1,2,7,8,11,12} S_d(k) - \sum_{3,4,5,6,9,10} S_d(k) \right);$$

$$\Delta_{dxy} = v_{xy} - v_{yx} = \frac{1}{2(n_{d_1}^2 - n_{d_2}^2)} \left(\sum_{2,4} S_d(k) - \sum_{1,3} S_d(k) + 2n_{d_1}n_{d_2} \left(\sum_{9-12} S_d(k) - \sum_{5-8} S_d(k) \right) \right);$$

$$\Delta_{dyz} = v_{yz} - v_{zy} = \frac{1}{2(n_{d_1}^2 - n_{d_2}^2)} \left(\sum_{6,8} S_d(k) - \sum_{5,7} S_d(k) - 2n_{d_1}n_{d_2} \left(\sum_{1-4} S_d(k) - \sum_{9-12} S_d(k) \right) \right);$$

$$\Delta_{dxz} = v_{xz} - v_{zx} = \frac{1}{2(n_{d_1}^2 - n_{d_2}^2)} \left(\sum_{10,12} S_d(k) - \sum_{9,11} S_d(k) + 2n_{d_1}n_{d_2} \left(\sum_{1-4} S_d(k) - \sum_{5-8} S_d(k) \right) \right).$$

Методика калибровки. Это совокупность технических и вычислительных приемов, связанных с определением калибровочных коэффициентов. В соответствии со схемой калибровки двухканальной БИНС можно предложить следующую совокупность основных операций.

1. Задается модель ошибок БИНС и определяется ее фундаментальная матрица решений $H(t)$.

2. Задается первая ориентация стенда ($k = 1$).

2.1. Производится выставка БИНС по показаниям стенда, формируется начальный вектор ошибок модели $X(0)$ БИНС; включается инерциальный (автономный) режим работы БИНС на конкретный отрезок времени t_i ; в течение этого отрезка БИНС корректируется по углу азимута по сигналам стенда.

2.2. Производится обработка сигналов датчиков и БИНС, полученных на отрезке времени t_i ; формируются массивы показаний датчиков БИНС, ошибок выходных сигналов БИНС и вычисленных производных от ошибок выходных сигналов БИНС.

2.3. Выполняется идентификация входных сигналов модели ошибок $F(k)$ и определение векторов инструментальных ошибок акселерометров $\delta f_{x,y,z}^i(k)$ и гироскопов $\delta \omega_{x,y,z}^i(k)$.

2.4. Производится итерационная процедура уточнения входного сигнала $F(k)$ и векторов инструментальных ошибок акселерометров $\delta f_{x,y,z}^i(k)$ и гироскопов $\delta \omega_{x,y,z}^i(k)$. На каждом цикле итераций ($i + 1$) осуществляется коррекция сигналов датчиков на величины $\delta f_{x,y,z}^i(k)$ и $\delta \omega_{x,y,z}^i(k)$ и повторяются операции пунктов 2.2, 2.3.

3. Задается следующая ориентация стенда ($k + 1$) и совокупность операций пункта 2 повторяется. После выполнения всех двенадцати ориентаций первый этап калибровки завершается.

4. На втором этапе калибровки вычисляются калибровочные коэффициенты.

5. Вычисленные коэффициенты заносятся в бортовой вычислитель БИНС и проводятся контрольные вычисления вектора ошибок X .

6. В случае неудовлетворительных результатов включается внешний итерационный цикл для уточнения составляющих вектора калибровочных коэффициентов с повторением операций пунктов 2–5.

Предложен способ калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок системы с коррекцией БИНС в процессе калибровки по сигналам калибровочного стенда. Разработаны алгоритмы калибровки и выполнена оценка их эффективности. Получены зависимости для вычисления калибровочных коэффициентов датчиков БИНС. Представлена методика калибровки с коррекцией БИНС по сигналам калибровочного стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Г., Ермаков В.С., Николаев С.Г., Колеватов А.П. Способ калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Патент РФ № 2406973. Приоритет 10.08.2010.
2. Николаев С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Известия вузов. Приборостроение. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2009. Т. 52. № 7. С. 50–55.
3. Голован А.А., Парусников Н.А. Математи-

ческие основы навигационных систем: Ч. I. Математические модели инерциальной навигации. М.: МАКС Пресс, 2011. 136 с.

4. Коддингтон Э.А., Левинсон Н. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Иностран. лит., 1958. 462 с.

5. Деревянкин А.В., Матасов А.И. Методика калибровки блока акселерометров при грубой информации о его угловом положении. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. 69 с.



REFERENCES

1. **Andreyev A.G., Yermakov V.S., Nikolayev S.G., Kolevatov A.P.** Sposob kalibrovki besplatformennykh inertzialnykh navigatsionnykh sistem, *Patent RF No. 2406973*, Prioritet 10.08.2010. (rus)
2. **Nikolayev S.G.** Kalibrovka besplatformennykh inertzialnykh navigatsionnykh sistem, *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye*. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2009, Vol. 52, No. 7, Pp. 50–55. (rus)
3. **Golovan A.A., Parusnikov N.A.** Matematicheskiye osnovy navigatsionnykh sistem: Chast I. *Matematicheskiye modeli inertzialnoy navigatsii*. Moscow: MAKS Press Publ., 2011, 136 p. (rus)
4. **Koddington E.A., Levinson N.** *Teoriya obyknovennykh differentsialnykh uravneniy*. Moscow: Inostrannaya literatura Publ., 1958, 462 p. (rus)
5. **Derevyankin A.V., Matasov A.I.** *Metodika kalibrovki bloka akselerometrov pri gruboy informatsii o yego uglovom polozenii*. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova Publ., 2006, 69 p. (rus)

НИКОЛАЕВ Станислав Георгиевич — доцент кафедры измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов Пермского национального исследовательского политехнического университета.

614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29.

E-mail: nikolaev@ppk.perm.ru

NIKOLAEV, Stanislav G. *Perm National Research Polytechnic University*.

614990, Komsomolsky Ave. 29, Perm, Russia.

E-mail: nikolaev@ppk.perm.ru

ИВШИНА Юлия Владимировна — старший преподаватель кафедры измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов Пермского национального исследовательского политехнического университета.

614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29.

E-mail: uivka@yandex.ru

IVSHINA, Yulia V. *Perm National Research Polytechnic University*.

614990, Komsomolsky Ave. 29, Perm, Russia.

E-mail: uivka@yandex.ru



CIRCUITS
AND
SYSTEMS
SOCIETY

ISSCS 2015

12-th International Symposium on Signals, Circuits and Systems

Iasi, Romania, July 9–10, 2015

organized by:

Faculty of Electronics, Telecommunications and Information Technology, "Gh. Asachi" Technical University of Iasi
IEEE Romania Section & CAS Chapter in cooperation with IEEE CAS Society

Call for Papers

Honorary Chair

Ion Bogdan

Technical University of Iasi,
Romania

General Co-Chairs

Liviu Goras

Technical University of Iasi,
Romania

Sanjit Mitra

University of California,
Santa Barbara, CA, USA

Technical Program Committee

Majid Ahmadi, Canada - Chair

Adnan Al-Alaoui, Lebanon

Marco Carli, Italy

Jonathon Chambers, U.K.

Qionghai Dai, China

Daniel Foty, U.S.A.

Gordana Jovanovic-Dolecek,
Mexico

Pedro Julián, Argentina

Chan Hin Kam, Singapore

Abhay Karandikar, India

André Kaup, Germany

Alexander Korotkov, Russia

Franco Maloberti, Italy

Rui Paulo da Silva Martins,
Macau

Yoshikazu Miyanaga, Japan

Georgi Nenov, Bulgaria

Antonio Petraglia, Brazil

Branimir Reljin, Serbia

Corneliu Rusu, Romania

Mohamad Sawan, Canada

Erchin Serpendin, U.S.A.

Mani Soma, U.S.A.

Thanos Stouraitis, Greece

Wonyong Sung, Korea

Ioan Tabus, Finland

Siddik Yarman, Turkey

ISSCS 2015 aims at bringing together scientists and researchers from academia and industry to present and discuss some of their latest ideas and results.

Prospective authors are invited to submit original papers in the following areas:

- **Linear and Nonlinear Circuits & Systems**
- **Circuits & Systems for Communications**
- **Power Electronic Circuits**
- **Analog and Digital Signal Processing**
- **Image and Video Processing**
- **VLSI Circuits & Systems**

The official language of the symposium will be English.

AUTHOR'S SCHEDULE:

Proposals for special sessions	December 8, 2014
Submission of full paper	February 16, 2015
Notification of acceptance	April 6, 2015
Submission of camera-ready version and registration form with signed copyright form	May 4, 2015

The papers should be written in IEEE/CAS A4 format (double column including paper title, authors' names and affiliation, short abstract). They should not exceed 4 pages (including figures and references).

Authors are expected to present their papers at the Symposium. At least one author of each accepted paper must register in order to have the paper included in the program and Proceedings.

ISSCS 2015

<http://scs.etti.tuiasi.ro/isscs2015>

Faculty of Electronics & Telecommunications

Bd. Carol I no.11, Iasi

700506, ROMANIA

Conference email address:

isscs2015@etti.tuiasi.ro

Call for Papers:

The FedCSIS Events provide a platform for bringing together researchers and practitioners to present and discuss ideas, challenges, and new solutions in computer science and information systems. Topics of interest are defined by Events constituting FedCSIS and listed on <http://www.fedcsis.org>

The papers should be submitted to the chosen Event by April, 24, 2015 using the FedCSIS submission system available at <http://www.fedcsis.org>

Accepted and presented papers will be published in the IEEE Xplore Digital Library proceedings entitled "*2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*". Because the IEEE proceedings will be published under nonexclusive copyright, the Events' organizers will endeavor to arrange quality journals, edited volumes, etc. and will invite extended and revised papers for post-conference publications.

Important Dates:

Submission of Event Proposals: **October 31, 2014**

Paper submission: **April 24, 2015**

Author Notification: **June 15, 2015**

Final submission and registration: **July 1, 2015**

Conference date: **September 13-16, 2015**

Chair of FedCSIS 2015

Kucharski, Jacek
Łódź University of Technology

Honorary Chair 2015

Sankowski, Dominik
Łódź University of Technology
<http://www.kis.p.lodz.pl/sankowski.html?lang=en>

Chair of the Organizing Committee of FedCSIS 2015

Romanowski, Andrzej
Łódź University of Technology
<http://www.kis.p.lodz.pl/staff.44.html?lang=en>

Chairs of FedCSIS Conference Series

Ganzha, Maria
Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences,
Warsaw and University of Gdańsk, Poland
<http://inf.ug.edu.pl/~mganzha/>

Maciaszek, Leszek A.
Wrocław University of Economics, Poland
and Macquarie University ~ Sydney, Australia
<http://www.iie.ue.wroc.pl/lmaciaszek/en>

Paprzycki, Marcin
Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences,
Warsaw and Management Academy, Warsaw, Poland
<http://www.ibspan.waw.pl/~paprzycki/>



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»

№ 4 (200) 2014

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

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный 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 30.08.2014. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,95. Уч.-изд. л. 12,95. 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 публикациях представлены в РИНЦ, 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. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук — 8–15 страниц формата А-4; аспирантов — 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

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 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул — в редакторе **MathType**. 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 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;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.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:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru