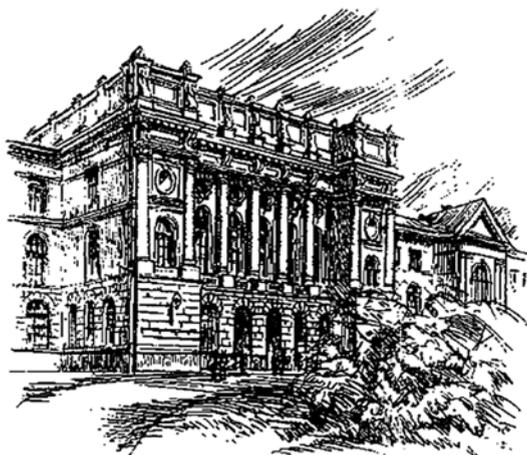


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

6(186) 2013

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев Ю.С., академик РАН (председатель); *Алферов Ж.И.*, академик РАН;
Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины;
Костюк В.В., академик РАН; *Лагарьков А.Н.*, академик РАН;
Лопота В.А., чл.-кор. РАН; *Окрепилов В.В.*, академик РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН; *Примаков Е.В.*, академик РАН;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН; *Тендлер М.Б.*, ин. член РАН (Швеция);
Федоров М.П., академик РАН.

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале 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>

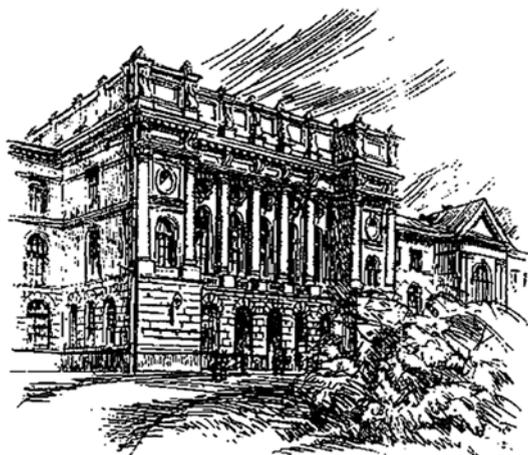
При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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, 2013

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

6(186) 2013

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2013

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

EDITORIAL COUNCIL

Y.S. Vasiliev – full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University, editor-in-chief; *Zh.I. Alferov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *M.Z. Zgurovskii* – foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine; *V.V. Kostyuk* – full member of the Russian Academy of Sciences; *A.N. Lagar'kov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Lopota* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *V.V. Okrepilov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *B.E. Paton* – full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine; *E.M. Primakov* – full member of the Russian Academy of Sciences; *A.I. Rudskoy* – corresponding member of the Russian Academy of Sciences; *M.B. Tendler* – foreign member of the Russian Academy of Sciences (Sweden); *M.P. Fedorov* – full member of the Russian Academy of Sciences.

COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

JOURNAL EDITORIAL COUNCIL

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

JOURNAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

Subscription index **47517** in the «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, 2013



Содержание

Инфокоммуникационные технологии

Богач Н.В., Вылегжанина К.Д., Милицын А.В. <i>Онтологические модели в разработке инструментов оценки коммуникационных протоколов гетерогенных иерархических беспроводных сенсорных сетей</i>	9
---	---

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Заборовский В.С., Гук М.Ю., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С. <i>Сетецентрический подход к созданию системы удаленного управления робототехническими объектами с борта орбитальной станции</i>	17
Самочадин А.В., Носницын С.М., Рогов П.А., Хмельков И.А. <i>Реализация мобильных сервисов, основанных на местоположении пользователя, с помощью MDM системы</i>	27

Проблемы передачи и обработки информации

Заборовский В.С., Ильяшенко А.С., Мулюха В.А. <i>Алгоритмы управления характеристиками потоков пакетных данных в сетевой среде с использованием приоритетного вероятностного выталкивающего механизма</i>	35
Петров А.А., Давыдов В.В., Залетов Д.В., Шабанов В.Е. <i>Цифровой синтезатор частоты для квантового стандарта частоты на атомах Cs¹³³</i>	45

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Сивчек И.В., Сорочкин В.А. <i>Имитационная модель мощного генераторного тетрода</i>	53
--	----

Вычислительные машины и программное обеспечение

Бородин А.М., Мирвода С.Г., Поршневу С.В. <i>Анализ многомерных данных высокой размерности: проблемы доступа к данным и возможный подход к их решению</i>	59
Августинов Д.М. <i>Применение методов частотного анализа при создании программ для прогнозирования новостного потока</i>	67

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Зверева О.М., Берг Д.Б. <i>Агент-ориентированная модель коммуникаций экономической системы в условиях межотраслевого баланса Леонтьева</i>	77
Заяц О.И., Березин С.В. <i>Применение уравнения Пугачёва–Свешникова к исследованию кусочно-линейных стохастических систем, линейных в четвертях пространства</i>	87

Приборы, информационно-измерительные системы

Заревич А.И. <i>Цифровая обработка сигналов при автоматизированных испытаниях сильноточных шунтов</i>	103
--	-----

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Райчук Д.Ю., Самочадин А.В., Тимофеев Д.А., Рогов П.А., Иванченко Д.А. <i>Контекстно-зависимые мобильные сервисы для образовательных учреждений</i>	109
--	-----

Материалы конференции COMOD-2013

Екатеринчук Е.Д., Рязанова Т.В., Ряшко Л.Б. <i>Индукцированные шумом переходы в модели бизнес-циклов Гудвина</i>	117
Антонова А.С., Аксёнов К.А. <i>Применение мультиагентного и эволюционного моделирования при планировании работ</i>	126
Карлов И.А. <i>Восстановление пропущенных данных при численном моделировании сложных динамических систем</i>	137
Акишин А.А. <i>Применение пакета MatLab-Simulink для моделирования механических колебаний в программно-аппаратном комплексе реального времени</i>	145



Contents

Infotelecommunication Technologies

Bogach N.V., Vylegzhanina K.D., Militsyn A.V. <i>Ontology model driven development of attestation instruments for wireless sensor networks</i>	9
---	---

Telecommunication Systems and Computer Networks

Zaborovsky V.S., Guk M.Yu., Muliukha V.A., Ilyashenko A.S. <i>Network-centric approach to creating a remote control system for a robotic object from a board of an orbital station</i>	17
Samochadin A.V., Nosnitsyn S.M., Rogov P.A., Khmelkov I.A. <i>Implementation location-based services on the base of MDM system</i>	27

Information Transfer and Processing

Zaborovsky V.S., Ilyashenko A.S., Muliukha V.A. <i>Characteristics of the packet data flows control algorithm in a network environment based on priority probabilistic push-out mechanism</i>	35
Petrov A.A., Davydov V.V., Zaletov D.V., Shabanov V.E. <i>Digital frequency synthesizer for the quantum standard of frequency on atoms of CS^{133}</i>	45

Radio Engineering, Aerials, SHF-devices

Sivchek I.V., Sorotsky V.A. <i>Simulation model of power tetrode</i>	53
---	----

Computer Systems and Software

Borodin A.M., Mirvoda S.G., Porshnev S.V. <i>High dimensional data analysis: data access problems and possible solutions</i>	59
Avgustinov D.M. <i>Application of frequency analysis methods for news stream forecasting computer programs</i>	67

Mathematical Modelling: Methods, Algorithms, Technologies

Zvereva O.M., Berg D.B. <i>Economic system agent-based communication model based on Leontyev's intersectoral balance</i>	77
Zayats O.I., Berezin S.V. <i>Analysis of piecewise linear stochastic systems in quarter-spaces by means of the Pugachev–Sveshnikov equation</i>	87

Devices, Information-Measuring Systems

Zarevich A.I. <i>Digital signal processing for automated testing of high-current shunt</i>	103
---	-----

Information and Telecommunication Technologies in Education

Raychuk D.Yu., Samochadin A.V., Timofeev D.A., Rogov P.A., Ivanchenko D.A. <i>Context-aware services for educational organizations</i>	109
---	-----

COMOD-2013 Conference

Ekaterinchuk E.D., Ryazanova T.V., Ryashko L.B. <i>Noise-induced transitions for business cycles Goodwin model</i>	117
Antonova A.S., Aksyonov K.A. <i>Application of the simulation and evolutionary modelling in the scheduling</i>	126
Karlov I.A. <i>The missing value estimation in numerical modelling of complex dynamic systems</i>	137
Akishin A.A. <i>Matlab-Simulink application to modeling the mechanical vibration using real-time software and hardware</i>	145

УДК 004.056.05 004.054

Н.В. Богач, К.Д. Вылегжанина, А.В. Милицын

**ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В РАЗРАБОТКЕ ИНСТРУМЕНТОВ
ОЦЕНКИ КОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ
ИЕРАРХИЧЕСКИХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

N.V. Bogach, K.D. Vilegzhanina, A.V. Militsyn

**ONTOLOGY MODEL DRIVEN DEVELOPMENT OF ATTESTATION
INSTRUMENTS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS**

Предложен четырехуровневый иерархический каркас (фреймворк) в качестве средства разработки и аттестации коммуникационных протоколов беспроводных сетей сенсоров. Описаны модели, образующие верхний, онтологический, уровень иерархии.

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ; СЕНСОРЫ; ПРОТОКОЛ БЕЗОПАСНОСТИ; ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; КАРКАС; ФРЕЙМВОРК.

We propose a 4-level framework as a development and attestation instrument for secure communication protocols in wireless sensor networks. We also show how to build its baseline level - the ontology models.

WIRELESS SENSOR NETWORKS; SENSORS; SECURE COMMUNICATIONS; ONTOLOGY MODEL; FRAMEWORK.

Беспроводные сети сенсоров (БСС) находятся в фокусе внимания специалистов в течение последних десяти лет. Вопросы их безопасности выделены в самостоятельную область защиты информации. В зарубежных публикациях проблема защиты была впервые поставлена в [1], там же была предложена первая классификация уже известных компьютерных атак в приложении к БСС, а также рассмотрены две новые атаки, свойственные БСС, шторм hello-сообщений (hello flood) и «ложный сток» (sinkhole). БСС гетерогенной топологии представляют особенный интерес для исследователей ввиду двух обстоятельств: современная информационная среда имеет большое разнообразие аппаратных плат-

форм для построения сетей сенсоров (горизонтальная гетерогенность), распределение ролей в сети сенсоров (наличие узлов с большими возможностями, полномочиями и энергопотреблением и узлов с ограниченной функциональностью и малым энергопотреблением) позволяет достичь лучших показателей по главным задачам поддержки жизненного цикла сети, обеспечивая меньшее суммарное энергопотребление и лучшую управляемость аппаратуры сети и данных (вертикальная гетерогенность).

В настоящее время существует большое количество протоколов для решения частных задач безопасной передачи данных в БСС [2–5] и др. Однако их объективное сравнение и анализ безопасности затруд-

нены вследствие отсутствия единой методологии и инструментов оценки. Представляется конструктивным использовать иерархический подход, при котором сеть сенсоров описывается на различных уровнях абстракции. В качестве инструмента предлагается каркас (фреймворк), состоящий из следующих уровней: *онтологический* (аппаратно, программно и вычислительно независимый уровень моделей, связывающих понятия предметной области БСС), *архитектурный* (аппаратно и программно независимый уровень функциональных блоков коммуникационного протокола), *программный* (аппаратно независимый уровень моделирования режимов работы БСС в сетевом симуляторе с целью количественной оценки параметров протокола), уровень *встраиваемой* программы, где производится оценка накладных расходов портирования программного кода поддержки протокола на конкретную целевую платформу. Интерфейсами между уровнями служат соответственно требования к протоколу, функции протокола и программный код (рис. 1).

Фреймворк универсален как для описания и разработки новых протоколов, так и для аттестации уже существующих. Такой подход к оценке коммуникационных протоколов БСС идейно связан с аналогичными методологиями, существующими, например, в компьютерных сетях (ISO/OSI, TCP/IP) [6], в программной инженерии (IBM RUP, MDA) [7], управлении качеством, менеджменте и бизнесе (Cobit, BSC) [8, 9]. Это закономерно, если иметь в виду, что БСС принадлежит к классу распределенных динамических систем [10, 11].

Разработка моделей уровня онтологий

Онтологический уровень фреймворка (рис. 1) состоит из классификации задач БСС, классификации атак на БСС и модели жизненного цикла БСС.

Классификация задач БСС учитывает связи со смежными областями через пять главных задач поддержки жизненного цикла сети: энергообеспечение, поддержку конфигурации сети, управление данными, локализацию узлов и маршрутизацию. Она

отражает интеграцию задач информационной безопасности БСС в общий контекст жизненного цикла сети и является основой для практического применения подхода «обеспечение безопасности на этапе проектирования» (privacy by design) – одной из современных лучших практик безопасности [12]. Вопросы безопасности данных и каналов передачи информации являются критическим приоритетом и не могут решаться изолированно, поэтому проектирование функций безопасности должно вестись совместно с разработкой остальных функций системы.

Представленная далее классификация атак на сети сенсоров по их цели, в отличие от традиционных «плоских» перечислений, позволяет распределить ответственность по компонентам сети и достичь декомпозиции задачи обеспечения информационной безопасности в сетях сенсоров. Следующим шагом выполняется наложение динамики развития атак в БСС на фазы ее жизненного цикла в рамках общей среды моделирования. Совмещение двух предложенных моделей в диаграмме последовательностей жизненного цикла сети помимо выявления критически уязвимых точек жизненного цикла позволяет также сгенерировать требования к функциям протокола, чтобы перейти на следующий (архитектурный) уровень от уровня онтологических моделей. На следующем уровне производится сопоставление требований к протоколу с механизмами защиты, что служит основой разработки архитектуры протокола.

Классификация задач БСС. Сгруппируем задачи обеспечения функционирования беспроводной сенсорной сети следующим образом (см. рис. 2):

1. Поддержка конфигурации.
2. Локализация мобильных узлов.
3. Управление данными.
4. Маршрутизация.
5. Безопасность физической инфраструктуры и данных.

Сенсорный узел беспроводной сети ограничен в вычислительных возможностях и коммуникационных ресурсах. В связи с этим появляются специфические требова-

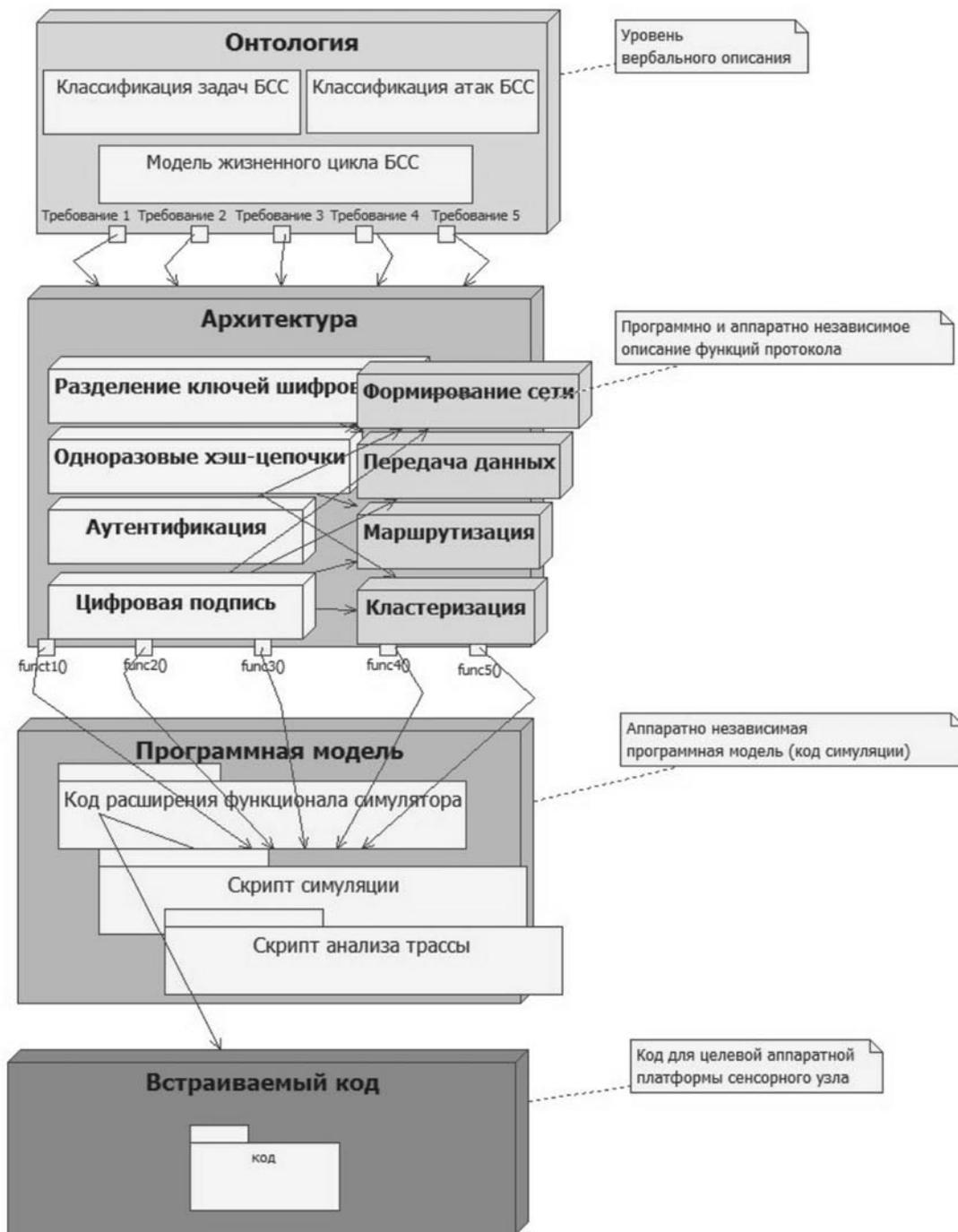


Рис. 1. Фреймворк для разработки и аттестации коммуникационных протоколов БСС

ния к механизмам защиты данных.

Классификация атак на БСС. Злоумышленник может прослушивать радиопередачи, вставлять сообщения и снова передавать ранее перехваченные пакеты. Далее злоумышленник может скомпрометировать

рядовые узлы сети и управляющие узлы кластера. Это означает, что злоумышленник получит доступ ко всей информации, хранящейся на данных узлах (такой, как криптографические ключи). Предполагается, что злоумышленник не может скомпрометиро-



Рис. 2. Классификация задач БСС

вать базовую станцию, и ему требуется некоторое время, чтобы скомпрометировать каждый очередной узел. Целью злоумышленника является подделка информации маршрутизации таким образом, чтобы контролировать все пути маршрутизации между узлами, например, перенаправить себе все сообщения для прослушивания, понизить производительность сети, произвести атаку типа «отказ в обслуживании» [7].

В БСС сохраняется принятое в теории информационной безопасности деление атак на внутренние и внешние, пассивные и активные. Внешние угрозы исходят извне сети сенсоров и могут выражаться в подслушивании передачи данных, а могут быть расширены до вставки поддельных данных с целью потребления ресурсов сети и развертывания атаки отказа в обслуживании. Внутренние угрозы исходят от скомпрометированных узлов, отправляющих злонамеренные данные и злоумышленников, захвативших криптографическое содержимое узлов. Нарушители внутренней и внешней различаются по следующему признаку: внешнему не доступны ключи шифрования и прочие коды, используемые в сети. Пассивные и активные атаки также традиционно отличаются друг от друга тем, что пассивный атакующий заинтересован только в сборе секретных данных из сенсорной сети, т. е. нарушает только секретность и конфиденциальность. Это по-

пытки воспользоваться данными без ведома их владельца. В таком случае атаку сложно распознать, поскольку целостность информации не нарушается, и предотвращение ее более успешно, чем попытки распознать в реальном масштабе времени.

Типичной для сетей сенсоров является разделение атак на атакующие класса «пыль» и атакующие класса «переносной компьютер». *Пылью* принято называть маломощные сенсорные узлы – в таком случае атакующему доступно несколько «пылинок» с такими же возможностями, как и остальные «пылинки» в сети, либо переносной компьютер. Беспроводные сети сенсоров, как и прочие беспроводные сети, поддаются определенным атакам ввиду преобладания широкополосной передачи сообщений и доступности передающей среды. Более того, сети сенсоров более уязвимы, т. к. сенсоры нередко устанавливаются в опасной и неблагоприятной среде, где их может захватить злоумышленник, и не обладают достаточными вычислительными способностями для реализации сильных надежных алгоритмов защиты, не обладают защищенной от подделки аппаратной частью. В случае иерархических БСС добавляются также атаки на управляющий узел кластера [12] (рис. 3).

Рассмотрим, каким образом можно увеличить информативность классификации

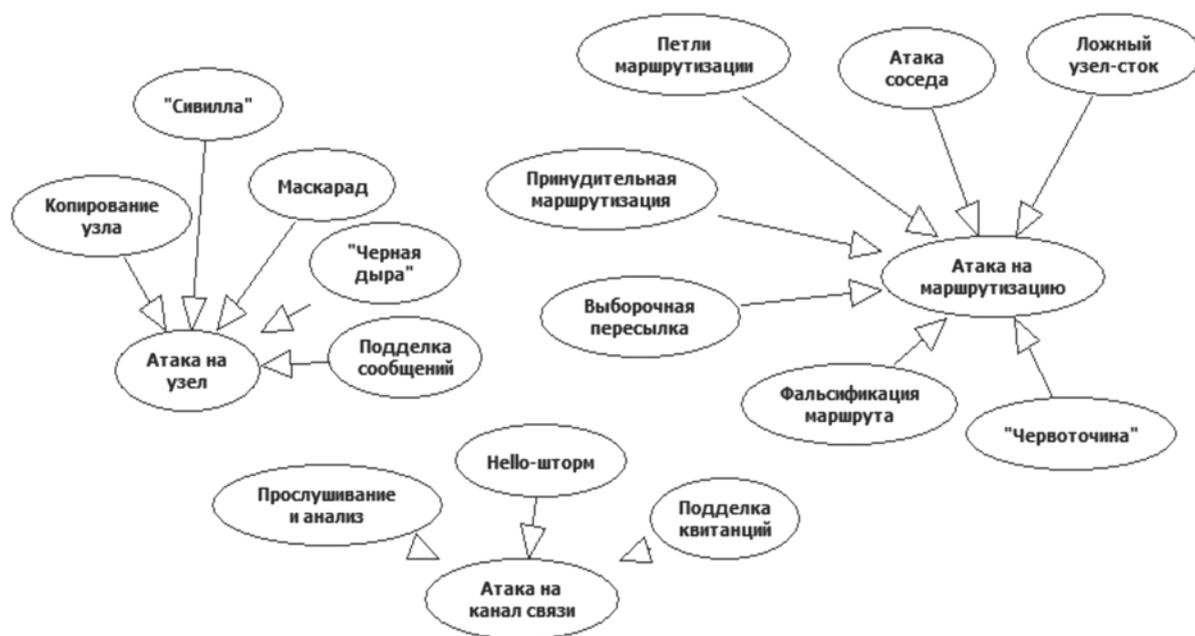


Рис. 3. Модель атак на БСС

атак на сети сенсоров, и выполним совмещение классификации атак с фазами жизненного цикла сети.

Совмещение моделей, выявление критически опасных фаз в жизненном цикле сети сенсоров. Для отображения фаз жизненного цикла сети сенсоров используем диаграмму последовательностей в UML-нотации. Будем считать, что сеть сенсоров имеет только вертикальную гетерогенность: в сети имеется базовая станция, управляющий узел и сенсорный узел. В радиусе вещания сети находится нарушитель, имеющий портативный компьютер с программным обеспечением, позволяющим принимать широкоэмитательные пакеты. Рассмотрим наиболее неблагоприятный сценарий развертывания атаки: раннее внедрение нарушителя в сеть (рис. 4). Из приведенной диаграммы следует, что на фазе конфигурации обмен общесетевыми и общекластерными параметрами доступен злоумышленнику и, следовательно, при разработке или аттестации коммуникационного протокола необходимо ответить, например, на следующие вопросы.

Каким образом обеспечивается конфиденциальность рассылки общекластерных и общесетевых параметров от базовой станции?

Каким образом обеспечивается конфиденциальность ответов от управляющих узлов? От сенсорных узлов?

Имеется ли в протоколе процедура безопасного обнаружения соседей?

Если на раннем этапе у нарушителя существует возможность внедрения в сеть, то дальнейшие механизмы защиты в протоколе не имеют значения. Таким образом, можно выявить первый очевидный приоритет. При моделировании сценариев позднего вторжения в уже сконфигурированную сеть можно выявить два пути проникновения нарушителя: через временный локальный отказ в обслуживании и через фальсификацию маршрутов. Локальный отказ также может быть следствием небезопасной процедуры обнаружения соседей.

Способ внедрения нарушителя в сконфигурированную сеть через навязывание ложных маршрутов представляет значительную опасность для сети. Это дает основания полагать, что именно функция маршрутизации коммуникационного протокола несет наибольшую ответственность за безопасность сети в целом. Таким образом, задачей онтологического уровня является формирование набора требований к протоколу. В

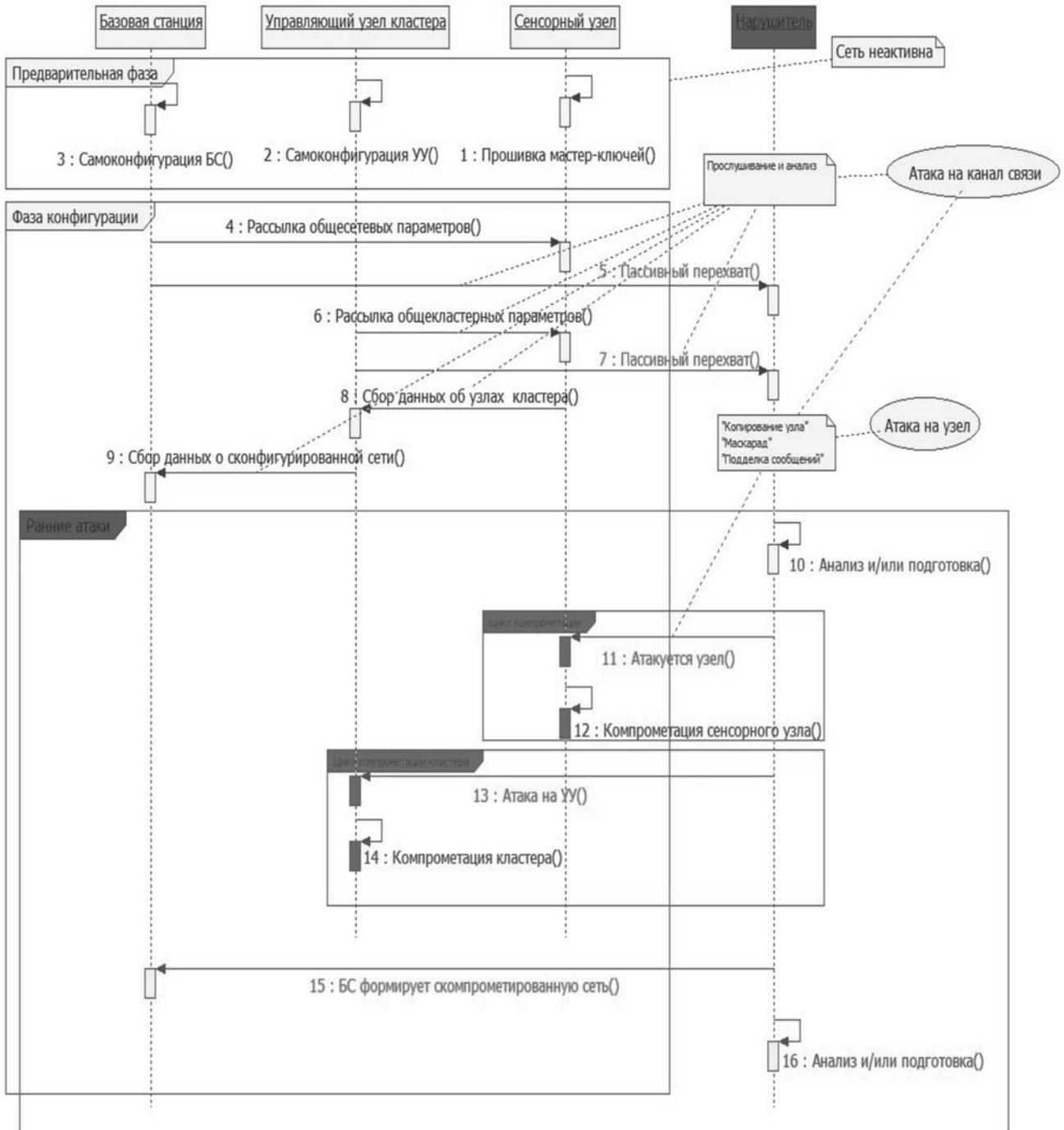


Рис. 4. Модель жизненного цикла БСС в присутствии раннего вторжения нарушителя

дальнейшем эти требования позволят обоснованно выбрать средства защиты при разработке архитектуры протокола.

В статье предложен четырехуровневый иерархический каркас (фреймворк) в каче-

стве средства разработки и аттестации коммуникационных протоколов БСС. Описаны модели, образующие верхний, онтологический, уровень иерархии.

Анализ полноты и безопасности разработываемых протоколов для сетей сенсоров

может быть проведен на основе предложенных моделей более наглядно, чем при использовании плоских систем классификации. По результатам анализа формируется набор требований к протоколу, который является интерфейсом к следующему уровню иерархии – уровню архитектуры

протокола. Применение иерархического каркаса в разработке или аттестации коммуникационного протокола БСС является основой методологии, имеющей много общего с общепринятыми методологиями и практиками разработки через моделирование (MDD).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Perrig A. [et al.]**. SPINS: Security Protocols for Sensor Networks // *Wireless Networks*. – 2002. – Vol. 8 – № 5. – P. 521–534.
2. **Wood A.D., Stankovic J.A.** Denial of Service in Sensor Networks // *Computer*. – 2002. – Vol. 35. – № 10. – P. 54–62.
3. **Hu L., Evans D.** Secure Aggregation for Wireless Network // *Proc. of the 2003 Symp. on Applications and the Internet Workshops (SAINT'03 Workshops)*. – P. 384–391.
4. **Karlof C., Wagner D.** Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures // *Ad Hoc Networks 1*. – 2003. – P. 293–315.
5. **Oliveira L.B., Wong H.Ch., Loureiro A.A.** LHA-SP: Secure Protocols for Hierarchical Wireless Sensor Networks. – 2005.
6. **Танненбаум Э.** Компьютерные сети. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с.
7. **Крачтен Ф.** Введение в Rational Unified Process. – 2-е изд.; Пер. с англ. – М.: ИД «Ви-

льямс», 2002. – 240 с.

8. **COBIT 5: A Business Framework for the Governance and Management of Enterprise IT** [электронный ресурс] / URL: <http://www.isaca.org/Cobit/Pages/default.aspx> (дата обращения 16.10.2013)

9. **Balanced scorecard basics** [электронный ресурс] / URL: <https://balancedscorecard.org/bscresources/aboutthebalancedscorecard/tabid/55/default.aspx>

10. **Cerpa A., Estrin D.** ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnsor Network Topologies // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2003. – Vol. 3(3). – P. 272–285.

11. **Liang Q.** Ad Hoc Wireless Network Traffic – Self-Similarity and Forecasting // *IEEE Communication Letters*. – 2002. – Vol. 6. – № 7. – P. 297–299.

12. **Dargie W., Poellabauer Ch.** Fundamentals of wireless sensor networks. Theory and practice. – Wiley, 2011.

REFERENCES

1. **Perrig A. et al.** SPINS: Security Protocols for Sensor Networks / *Wireless Networks*. – 2002. – Vol. 8 – № 5. – P. 521–534.
2. **Wood A.D., Stankovic J.A.** Denial of Service in Sensor Networks / *Computer*. – 2002. – Vol. 35. – № 10. – P. 54–62.
3. **Hu L., Evans D.** Secure Aggregation for Wireless Network / *Proc. of the 2003 Symp. on Applications and the Internet Workshops (SAINT'03 Workshops)*. – P. 384–391.
4. **Karlof C., Wagner D.** Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures / *Ad Hoc Networks 1*. – 2003. – P. 293–315.
5. **Oliveira L.B., Wong H.Ch., Loureiro A.A.** LHA-SP: Secure Protocols for Hierarchical Wireless Sensor Networks. – 2005.
6. **Tannenbaum E.** Komp'yuternye seti. – 4-e izd. – St.-Petersburg: Piter, 2003. – 992 s. (rus)
7. **Krachten F.** Vvedenie v Rational Unified

Process. – 2-e izd.; Per. s angl. – Moscow: ID «Vil'iams», 2002. – 240 s. (rus)

8. **COBIT 5: A Business Framework for the Governance and Management of Enterprise IT.** Available <http://www.isaca.org/Cobit/Pages/default.aspx> (Accessed 16.10.2013).

9. **Balanced scorecard basics.** Available <https://balancedscorecard.org/bscresources/aboutthebalancedscorecard/tabid/55/default.aspx>

10. **Cerpa A., Estrin D.** ASCENT: Adaptive Self-Configuring sEnsor Network Topologies / *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2003. – Vol. 3(3). – P. 272–285.

11. **Liang Q.** Ad Hoc Wireless Network Traffic – Self-Similarity and Forecasting / *IEEE Communication Letters*. – 2002. – Vol. 6. – № 7. – P. 297–299.

12. **Dargie W., Poellabauer Ch.** Fundamentals of wireless sensor networks. Theory and practice. – Wiley, 2011.

БОГАЧ Наталья Владимировна – доцент Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: n.v.bogach@gmail.com

BOGACH, Natalia V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

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

E-mail: n.v.bogach@gmail.com

ВЫЛЕГЖАНИНА Карина Дмитриевна – ассистент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: k.vilegzhanina@gmail.com

VILEGZHANINA, Karina D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

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

E-mail: k.vilegzhanina@gmail.com

МИЛИЦЫН Алексей Владимирович – доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: militsyn@gmail.com

MILITSYN, Alexei V. *St. Petersburg State Polytechnical University .*

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

E-mail: militsyn@gmail.com



Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 004.77

В.С. Заборовский, М.Ю. Гук, В.А. Мулюха, А.С. Ильяшенко

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С БОРТА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

V.S. Zaborovsky, M.Yu. Guk, V.A. Muliukha, A.S. Ilyashenko

NETWORK-CENTRIC APPROACH TO CREATING A REMOTE CONTROL SYSTEM FOR A ROBOTIC OBJECT FROM A BOARD OF AN ORBITAL STATION

Рассмотрен сетевый подход к развитию концепции «internet of things» на примере создания системы удаленного интерактивного управления робототехническими объектами. Рассматриваемый подход апробирован в серии космических экспериментов, проводимых специалистами ЦНИИ РТК и СПбГПУ. Для описания сетевой инфраструктуры предложено использовать иерархический подход, позволяющий выделить три уровня процессов информационного взаимодействия сетевых объектов, в частности, напланетных роботов и человека-оператора. Подробно изучен второй, мезоскопический уровень, описывающий информационно-транспортные процессы, связанные с формированием виртуальных соединений с требуемым уровнем качества передачи данных, в частности, к величинам задержек передачи пакетов, при которых реализуется режим телеприсутствия оператора в зоне выполнения операций.

УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ; СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП; СЕТЕВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА; ДИНАМИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ; СИЛОМОМЕНТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ.

The article focuses on the network-centric approach to the development of the «internet of things» concept by creating an interactive remote control system for robotic objects. This approach was used in a series of space experiments conducted by specialists of Center for Robotics and Technical Cybernetics and SPbGPU. To describe the network infrastructure we propose to use a hierarchical approach which allows to distinguish three levels of information interaction processes between network objects, particularly onsurface robots and human operator. In the paper is proposed the second mesoscopic level that describes informational transmission processes associated with the formation of virtual connections with the desired level of quality of service, in particular the packet delay values to ensure the telepresence of operator in zone operations.

REMOTE CONTROL; NETWORK-CENTRIC PRINCIPLES; TRANSPORT NETWORK INFRASTRUCTURE; DYNAMIC ADAPTATION; FORCE-TORQUE FEEDBACK.

Современные компьютерные сети могут рассматриваться как информационно-транспортные инфраструктуры, построенные на базе стека протоколов TCP/IP, что позволяет объединить в единую иерархическую мультисервисную среду различные

объекты управления, образуя т. н. *internet of things* [1, 2]. Такой подход применительно к созданию систем удаленного управления робототехническими объектами имеет ряд важных преимуществ, среди которых можно выделить масштабируемость, на-

дежность, адаптируемость. Эти качества особенно важны при создании систем удаленного управления напланетными роботами с борта пилотируемой орбитальной станции (ПОС).

Сетецентрический подход по отношению к решаемой задаче управления предполагает наличие иерархической структуры организации информационно-логической связанности роботов в мультипротокольную виртуальную сеть многоцелевых операций. Верхний макроскопический уровень описывает логическую и информационную связанность всей робототехнической системы на уровне прикладных и пользовательских сервисов. Этот уровень отвечает за организацию информационной связанности компонентов системы путем формирования мезообъектов – виртуальных соединений между роботами, отвечающих требованиям качества потоков данных между различными элементами распределенной системы. Другой задачей верхнего уровня является анализ целевой функции сложной операции, формирование последовательности более простых целей для реализации сложной операции и контроля их выполнения.

Данная статья посвящена исследованию алгоритмов и протоколов мезоскопического уровня, отвечающего за формирование виртуальных соединений, характеристики которых соответствуют требованиям качества информационных потоков напланетных роботов, необходимых для реализации режима телеприсутствия космонавта на борту ПОС. Под качеством передачи данных понимается ограничение на пропускную способность виртуального соединения, задержку передачи данных, в рамках такой связи, а также вероятность потери пакетов, формирующих данное соединение. Использование данной абстракции позволяет расширить возможности применения сетей пакетной коммутации с учетом задержек и потерь в каналах передачи информации, например для силомоментного очувствления процессов телеуправления. Представленный в статье сетецентрический метод управления, относящийся к данному уровню информационного взаимодействия оператора и робототехнического объекта,

основывается на механизмах виртуализации каналов передачи данных и формировании соединений, толерантных к задержкам.

Микроскопический уровень отвечает за организацию передачи сетевого пакетного трафика в динамической сетевой среде при условии обеспечения требуемых характеристик виртуальных соединений, что достигается используемым абсолютным приоритетом в обслуживании вместе с вероятностным вытесняющим механизмом. Подробнее методы обеспечения требуемых характеристик каналов связи рассмотрены в статье «Алгоритмы управления характеристиками потоков пакетных данных в сетевой среде с использованием приоритетного вероятностного выталкивающего механизма» (см. наст. издание), а также в работах [3–6].

В настоящей статье рассматриваются вопросы создания сетецентрического подхода к созданию системы удаленного управления, толерантной к задержкам. Отработка алгоритмов осуществляется с использованием системы интерактивного управления динамическими объектами с борта ПОС. Созданная программная среда предоставляет широкие возможности для отработки предлагаемых алгоритмов управления объектами в реальном масштабе времени. В качестве прикладной задачи в статье исследуется алгоритм динамической настройки силомоментных воздействий задающего манипулятора-джойстика (ЗМ), который используется оператором, находящимся на борту ПОС.

Сетецентрические технологии управления с использованием информационно-транспортной инфраструктуры

Создание сетецентрических систем управления на базе сетевых технологий открывает новый этап в развитии как теории «internet of things», так и практики удаленного управления различными объектами. При этом в системах управления на первый план выходят принципы самоорганизации и адаптации управляемых объектов. Особые условия для реализации таких принципов возникают в тех случаях, когда в конту-

ре управления сетевым объектом находится человек-оператор.

Примером подобной задачи может быть космический эксперимент (КЭ) «Контур 2», особенностью которого является тот факт, что объекты сетевого управления представлены двумя типами роботов, функционирующих в различных режимах, но управляемых с помощью одного устройства – двухкоординатного задающего манипулятора. Это устройство оснащено электроприводами, формирующими регулируемые усилия (моменты) по двум ортогональным осям рукоятки управления. Для управления первым типом роботов используется синхронный канал связи, задержка в котором не превышает 15 мс, а величина дисперсии задержки (джиттера) не более 10 % от значения параметра РТТ. В этом случае оператор может использовать режим билатерального управления роботом [7, 8]. Для управления вторым типом роботов используется виртуальный канал, проходящий через сегмент сети Интернет. Неотъемлемым свойством такого канала является высокое значение величины и дисперсии РТТ, что снижает эффективность использования режима телеприсутствия, но позволяет оператору с помощью обратного усилия на рукоятке ЗМ оценивать свойства сетевой среды, в которой функционирует исполнительный элемент робота. Подобное повышение информативности управления за счет эффекта силомоментного очувствления задержек позволяет оператору корректировать скорость и направления перемещения робота, а с помощью воздействия на рукоятку джойстика – ощущать влияние сетевой среды и формировать оценку задержки данных в каналах связи КЭ «Контур-2», которые включают в себя:

- асимметричный радиоканал S-band, обеспечивающий передачу данных между бортом МКС и наземной приемной станцией, расположенной на территории Германии, и обеспечивающий сеанс связи на протяжении 9-10 мин (256 кбит/с от Земли к МКС и 4 Мбит/с от МКС к Земле);
- цифровую синхронную линию связи между наземной приемной станцией и объектом управления;

- публичную сеть (Интернет), связывающую немецкий наземный сегмент с российским.

Особенности исследуемой сетевой среды характеризуются необходимостью использования на российской стороне режима компенсации задержек, неупорядоченной доставки или потерь пакетов при прохождении данных через сеть Интернет, что позволяет реализовать интерактивное управление, учитывающее пространственные и временные ограничения.

Алгоритм двухконтурной системы управления

Учитывая особенности используемой сетевой среды, процессы информационного обмена ЗМ и робота предлагается декомпозировать на два класса: локальную обработку команд управления в режиме жесткого реального времени и процессы доставки команд управления через сетевую инфраструктуру с использованием модели взаимодействия типа «точка-точка» и протоколов из стека TCP/IP. Организованная таким образом система обеспечивает взаимодействие двух контуров управления (рис. 1):

- локального контура, в котором программный модуль «контроллер ЗМ» (КЗМ) обеспечивает циклический опрос текущих координат ЗМ, вычисление и отправку в ЗМ вектора силы, зависящего от текущего положения и скорости перемещения рукоятки, а также информации обратной связи (T'), получаемой от объекта управления (ОУ);
- сетевого контура, в котором программные компоненты используются для организации процесса передачи векторов управления (C) и данных телеметрии (T) между КЗМ и ОУ.

Основой сетевого контура управления является программный модуль Транспорт, состоящий из сетевых модулей задающего манипулятора и ОУ (СМЗМ и СМОУ, соответственно, см. рис 1), связанных виртуальным транспортным каналом, построенным на базе протокола UDP [9]. С конечными системами (КЗМ и ОУ) сетевые модули связаны через модули адаптации (МА) к свойствам среды передачи (МАЗМ и МАОУ, соответственно).

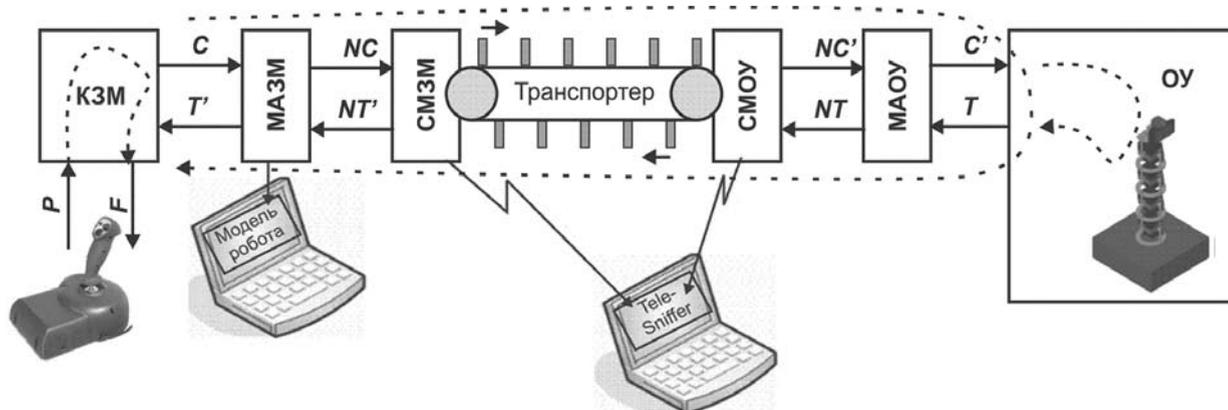


Рис. 1. Структура системы телеуправления

Очевидно, что для обеспечения плавности управления силовым воздействием на рукоятку ЗМ частота циклов КЗМ должна быть достаточно высокой. Связку КЗМ–ЗМ при этом можно рассматривать как «почти аналоговую» систему, что упрощает математическое описание системы и анализ ее устойчивости. Также как аналоговую систему желательно рассматривать и ОУ со своим локальным контуром управления, обеспечивающим его движение под управлением задания, приходящего в виде вектора C' . Обе эти конечные «почти аналоговые» системы объединяются в глобальный контур через сеть с пакетной коммутацией. Темп посылки пакетов по сети может быть значительно ниже частоты циклов КЗМ, поэтому связь по сети следует рассматривать как дискретную (по времени), причем, вносящую существенное запаздывание.

Программный модуль Транспортер основан на протоколе UDP и предназначен для обеспечения изохронной связи локальных контроллеров: отсчеты вектора управления, равномерно получаемые от локального контроллера ЗМ, должны также равномерно передаваться локальному контроллеру ОУ. Аналогично во встречном направлении должны передаваться отсчеты вектора телеметрии. Таким образом, организуется дискретная связь «почти аналоговых» конечных систем с частотой дискретизации, равной частоте отправки сообщений. Однако задержка доставки, вносимая сетью

Интернет, не является постоянной. Задачей принимающей части Транспортера является контроль правильного порядка поступления пакетов. Транспортер также определяет текущее состояние среды передачи: задержку доставки (среднюю и вариации), а также вероятность пропадания сообщения.

Кроме изохронной доставки потоков отсчетов векторов, Транспортер обеспечивает и доставку асинхронных сообщений о событиях, имеющих отношение к процессу телеуправления. Примером таких событий является нажатие кнопок, имеющих на рукоятке ЗМ. Такие события возникают эпизодически в произвольный момент времени, но они должны гарантированно дойти до получателя, сохраняя привязку по времени к передаваемому изохронному потоку отсчетов.

Для учета задержек в канале связи в контур управления добавлены элементы, которые называются *модулями адаптации*. Задачами модулей адаптации является восполнение пропущенных отсчетов, а также трансляция векторов управления и телеметрии (C, T) в сообщения, передаваемые по сети (NC, NT), с учетом текущих параметров среды передачи (и обратные преобразования на противоположной стороне). Модули адаптации предназначены для решения задачи обеспечения управляемого устройства дополнительной информацией, что позволит не допустить перерывов в процессе передачи управляющих сигналов и тем самым обеспечить плавность управле-

ния роботом. В простейшем случае трансляция прозрачна: в сообщениях передаются непосредственно текущие (на момент отправки) значения соответствующих векторов (отсчеты), и на принимающей стороне эти векторы передаются в локальный контур управления. Для визуализации модели робота и контроля процессов управления Транспортер передает на компьютер оператора потоки отсчетов векторов текущей позиции ЗМ и телеметрии. Для отладочных целей в сетевые модули введена возможность отправки сообщений трассировки на внешний приемник (на рис. 1 обозначен как TeleSniffer).

Структура системы управления

По результатам анализа ряда работ по соответствующей тематике [4–7] построена схема контура управления, позволяющего решить поставленную задачу. Данная схема изображена на рис. 2.

На схеме можно видеть разделение контура на три основные части:

- контур управляющего устройства (на схеме слева), выходом которого является вектор управления C , отображающий текущее положение рукоятки манипулятора p_m . Перемещение рукоятки определяется силой f , складывающейся из силы воздействия оператора f_h , силы f , формируемой

регулятором ЗМ, и силы f_e' , отображающей силу воздействия окружающей среды f_e на робота. Входом p регулятора ЗМ является рассогласование текущей позиции ЗМ (p_m) с отображением текущей позиции робота (p_s). Параметры регулятора – вектор $\{A\}$ – могут изменяться динамически;

- средства коммуникации (Транспортер), вносящие задержки доставки, и модули адаптации, парирующие действие этих задержек. В общем случае задержки в прямом (T_f) и обратном канале (T_b) могут быть различными;

- контур управляемого устройства (на схеме справа), вырабатывающего воздействие на робота по рассогласованию его текущей позиции p_s и отображения p_m' позиции задающего манипулятора. На робота также может воздействовать окружающая среда с силой f_e . В качестве обратной связи может использоваться вектор текущей позиции робота p_s и, при наличии соответствующих датчиков, вектор силы воздействия окружающей среды f_e .

Модель настройки параметров контура управления

Организация телеприсутствия требует, чтобы в процессе управления оператор имел возможность «ощущать» текущее состояние робота и сети передачи данных.

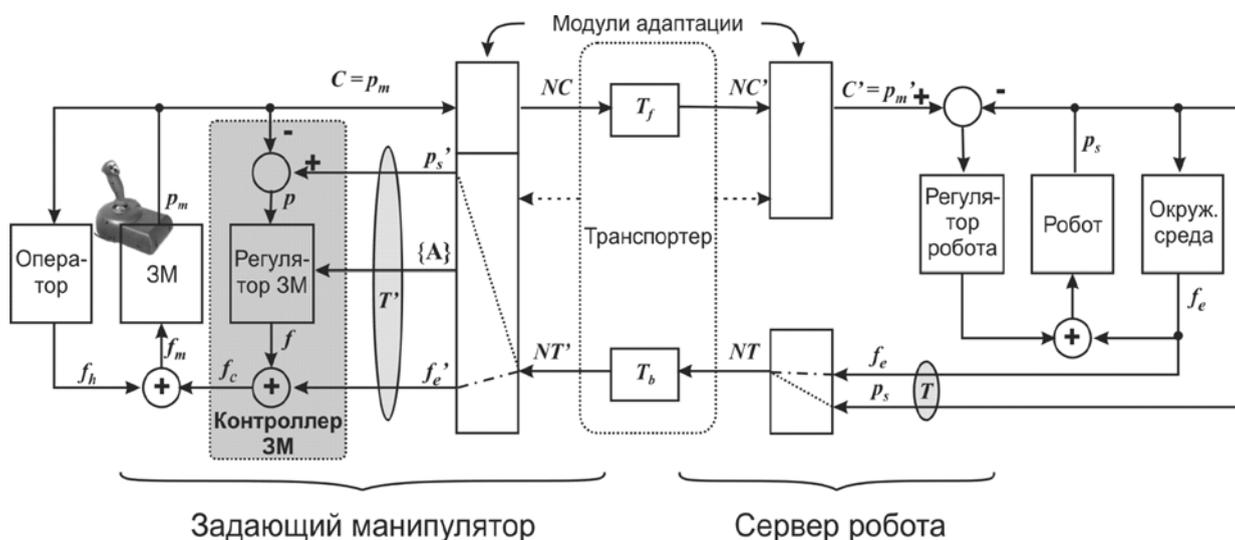


Рис. 2. Организация контура управления, толерантного к задержкам

Поэтому для описания конфигурационного пространства системы управления предлагается использовать модель виртуальной пружины, закрепленной одним концом в основание джойстика, начальное положение которой совпадает с текущим положением управляемого робота. В начальном положении робот никаким образом не воздействует на ЗМ. Однако если оператор начнет осуществлять управление и выводить джойстик из начального положения, то чем дальше будет отведен джойстик от начального положения, тем большие усилия операция растяжения виртуальной пружины потребует от оператора. На рис. 2 представлена схема, реализующая алгоритм расчета величины силомоментного воздействия, которую ощущает оператор в процессе управления. Сила упругости виртуальной пружины рассчитывается по результатам анализа текущего положения джойстика с учетом пришедшей информации о положении робота, которая рассчитывается по формуле:

$$p = p'_s - p_m, \quad (1)$$

где p'_s – вектор координат робота, который на данный момент доступен для обработки в модуле адаптации джойстика; p_m – теку-

щее положение манипулятора. Расчет силового воздействия, ощущаемого оператором, производится по следующей формуле:

$$f(t) = A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p}, \quad (2)$$

где A_0 – астатизм системы; A_1 – жесткость виртуальной пружины; A_2 – вязкость среды, в которой происходит управление; A_3 – виртуальная масса рукоятки.

В процессе управления стартовое положение виртуальной пружины будет изменяться так, чтобы совпасть с текущим положением координат робота. Для «очувствления» состояния среды передачи данных жесткость виртуальной пружины должна не только увеличиваться в зависимости от расхождения положения робота и ЗМ, но и корректироваться с учетом величины задержки данных в канале связи, увеличивая, таким образом, инерционность сетевого контура управления.

Для реализации такого режима взаимодействия на управляющем устройстве потребуется обрабатывать дополнительный объем информации о состоянии канала связи, в качестве которой в ЗМ используются упорядоченная по времени последовательность отсчетов параметра задержки

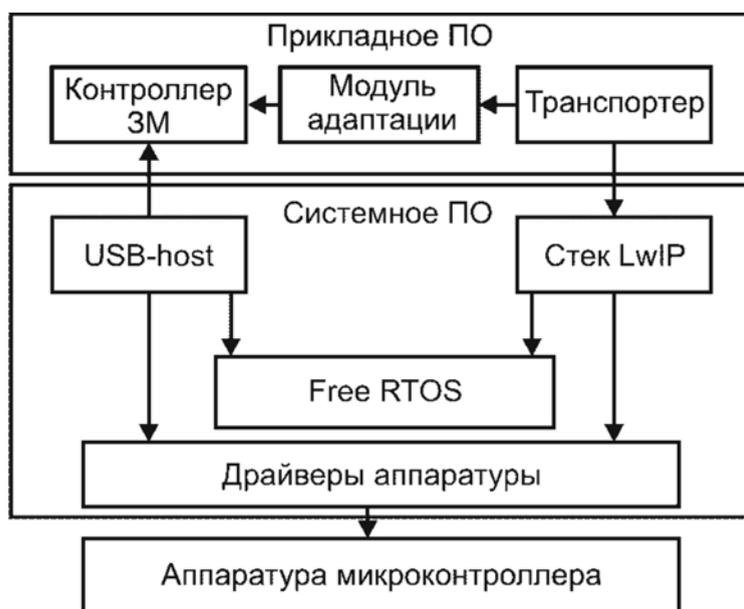


Рис. 3. Структура ПО задающего манипулятора

RTT и доля потерянных сетевых пакетов (ДПП) [3, 4, 10] по формуле (3), который соизмерим с постоянной времени всей замкнутой системы управления:

$$f(t) = (A_0 \int_0^t p(\tau) d\tau + A_1 p + A_2 \dot{p} + A_3 \ddot{p}) + A_4 \cdot \text{RTT} \cdot \text{ДПП} \cdot \frac{p}{\|p\|}, \quad (3)$$

где A_4 – коэффициент влияния среды передачи данных на силовомоментное очувствление.

В результате при увеличении задержек величина силового воздействия на рукоятку ЗМ не позволит оператору осуществлять быстрое изменение его положения. Это обстоятельство хотя и уменьшит скорость перемещения робота, но позволит оператору корректировать результаты отработки операций, анализируя данные об управляющих воздействиях, несмотря на то, что эти данные станут доступны оператору с задержкой.

Согласно требованиям билатерального управления, программное обеспечение двухконтурной системы телеуправления является симметричным. Локальные контроллеры как ЗМ, так и робота реализованы в виде ПИД-регуляторов и отличаются друг от друга лишь параметрами настройки. На рис. 3 приведена структура разработанного программного обеспечения задающего манипулятора джойстика, для реализации которого используется 32-разрядный ARM микроконтроллер.

Программный модуль контроллера ЗМ обеспечивает чтение текущих координат и состояния кнопок джойстика, а также формирование и подачу команд управления силовым воздействием. Модуль реализует функции ПИД-регулятора, для которого входная величина и коэффициенты в законе управления формируются программным модулем адаптации.

Модуль Транспортера осуществляет регулярный прием и передачу данных из сети, обращаясь к модулю адаптации для преобразования векторов управления и телеметрии, а также обработки текущей ин-

формации о задержках в канале передачи данных. Модуль адаптации осуществляет преобразования, обеспечение устойчивости замкнутой системы и показатели качества управления.

Модуль Транспортер активизируется с удвоенной частотой обмена данными, что позволяет вызывать модуль адаптации, попеременно передавая ему на обработку то вектор телеметрии, полученный от робота, то вектор управления, полученный от контроллера джойстика. Результат работы модуля адаптации, соответственно, передается контроллеру джойстика или отправляется по сети объекту управления. Если в нужный момент времени во входной очереди сообщений нет, то в этом случае модуль адаптации формирует управляющее воздействие на основе предсказанного с использованием (3) вектора значения жесткости виртуальной пружины и скорости перемещения исполнительного органа робота.

В статье рассмотрен новый подход к развитию концепции «internet of things» на примере создания системы удаленного управления робототехническими объектами в процессе космического эксперимента «Контур-2». Данный подход подразумевает наличие иерархической структуры, включающей три уровня: макроуровень, осуществляющий логическую связанность объектов; мезоуровень, отвечающий за формирование виртуальных каналов связи; микроуровень обработки сетевых пакетов. Предложены протоколы и алгоритмы мезоскопического уровня, позволяющие использовать сетевые технологии для формирования информационно-транспортной инфраструктуры нового класса, объединяющей различные технические устройства и человека-оператора в систему.

Для отработки новых технических решений и трансфера технологий используются возможности существующей информационно-коммуникационной инфраструктуры управления динамическими объектами на поверхности Земли с борта Международной космической стан-

ции [11]. Особенностью предложенного решения является использование двух-контурной системы, в которой «почти аналоговые» локальные объекты связаны телематическими каналами, вносящими переменные задержки в процесс доставки информации. Предложенная модель силомоментного оцувствления позволяет «виртуализировать» инерционность объекта управления путем количественной оценки времени задержки в доставке пакетов данных и идентифицировать состояние транспортной инфраструктуры для

выбора безопасной скорости перемещения динамического объекта. Предложена архитектура программного обеспечения, позволяющая реализовать интерактивное взаимодействие оператора и динамического объекта управления в билатеральном режиме.

Работа выполнена специалистами ЦНИИ РТК и СПбГПУ, кафедры телематики (при ЦНИИ РТК) по программе КЭ «Контур-2» при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13 07 12106 офи_м, Министерства образования и науки РФ и контракта СПбГПУ с компанией FORD Motors, заключенного в рамках University Research Program.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashton Kevin. That 'Internet of Things' Thing, in the real world things matter more than ideas // RFID Journal. 22.06.2009.
2. Gubbia J., Buyyab R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29. – P. 1645–1660.
3. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 1 // Программная инженерия. – 2012. – № 2. – С. 22–28.
4. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 2 // Программная инженерия. – 2012. – № 3. – С. 21–29.
5. Zaborovsky Vladimir, Zayats Oleg, Mulukha Vladimir. Priority Queueing With Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism // Proc. of The IX Internat. Conf. on Networks (ICN 2010), Menuires, The Three Valleys, French Alps, 11-16 April 2010. – Published by IEEE Computer Society, 2010. – P. 316–320.
6. Заборовский В.С. Кондратьев А.С., Силенко А.В., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С.,

- Филиппов М.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 6(162). – С. 23–32.
7. Artigas Jordi, Jee-Hwan Ryu, Preusche C., Hirzinger G. Network representation and passivity of delayed teleoperation systems // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ Internat. Conf. on 25–30 Sept. 2011. – P. 177–183.
8. Niemeyer Gьnter, Jean-Jacques E. Slotine. Telemanipulation with time delays // Internat. J. of Robotics Research. – Sept. 2004. – № 23(9). – P. 873–890.
9. Гук М.Ю., Селезнев К.С., Балицкий В.И., Колесник А.М. Реализация алгоритмов взаимодействия с удаленными робототехническими объектами через ненадежные каналы связи // Св-во о гос. рег. программ для ЭВМ № 2012619599.
10. Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kupreenko Sergey, Mulukha Vladimir. Dynamic Access Control in Cloud Services // Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – 2011. – Vol. 7. – № 3/4. –P. 264–277.
11. Ford Studying Space Robots with the Russians for Next-Gen Vehicle Communications Systems [электронный ресурс] / URL: <http://www.technologytell.com/in-car-tech/5137/ford-studying-space-robots-with-the-russians-for-next-gen-vehicle-communications-systems/>

REFERENCES

1. Ashton Kevin. That 'Internet of Things' Thing, in the real world things matter more than ideas / RFID Journal. 22.06.2009.
2. Gubbia J., Buyyab R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / Future

Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29. – P. 1645–1660.

3. **Zayats O.I., Zaborovskiy V.S., Mulyukha V.A., Verbenko A.S.** Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного вытаскивающего механизма. Ч. 1 / Программная инженерия. – 2012. – № 2. – С. 22–28. (rus)

4. **Zayats, O.I., Zaborovskiy V.S., Mulyukha V.A., Verbenko A.S.** Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного вытаскивающего механизма. Ч. 2 / Программная инженерия. – 2012. – № 3. – С. 21–29. (rus)

5. **Zaborovsky Vladimir, Zayats Oleg, Mulukha Vladimir.** Priority Queueing With Finite Buffer Size and Randomized Push-out Mechanism / Proc. of The IX Internat. Conf. on Networks (ICN 2010), Menuires, The Three Valleys, French Alps, 11-16 Apr. 2010. – Published by IEEE Computer Society, 2010. – P. 316–320.

6. **Zaborovsky V.S., Kondratyev A.S., Silinenko A.V., Mulyukha V.A., Iyashenko A.S., Filippov M.S.** Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» / Научно-технические ведомости

SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. – St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – № 6(162). – С. 23–32. (rus)

7. **Artigas Jordi, Jee-Hwan Ryu, Preusche C., Hirzinger G.** Network representation and passivity of delayed teleoperation systems / Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ Internat. Conf. on 25–30 Sept. 2011. – P. 177–183.

8. **Niemeyer G nter, Jean-Jacques E. Slotine.** Telemanipulation with time delays / Internat. J. of Robotics Research. – Sept. 2004. – № 23(9). – P. 873–890.

9. **Guk M.Yu., Seleznev K.S., Balitskiy V.I., Kolesnik A.M.** Realizatsiya algoritmov vzaimodeystviya s udalennymi robototekhnicheskimi obyektami cherez nenadezhnyye kanaly svyazi / Sv-vo o gos. reg. programm dlya EVM № 2012619599. (rus)

10. **Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kuprenko Sergey, Mulukha Vladimir.** Dynamic Access Control in Cloud Services / Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – 2011. – Vol. 7. – № 3/4. – P. 264–277.

11. Ford Studying Space Robots with the Russians for Next-Gen Vehicle Communications Systems. Available <http://www.technologytell.com/in-car-tech/5137/ford-studying-space-robots-with-the-russians-for-next-gen-vehicle-communications-systems/>

ЗАБОРОВСКИЙ Владимир Сергеевич – *заведующий кафедрой телематики (при Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики) Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vlad@neva.ru

ZABOROVSKY, Vladimir S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politeknicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vlad@neva.ru

ГУК Михаил Юрьевич – *начальник отделения Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: mgook@stu.neva.ru

GUK, Michail Yu. *Center for Robotics and Technical Cybernetics.*

194064, Tichoretskiy pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: mgook@stu.neva.ru

МУЛЮХА Владимир Александрович – *старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

MULIUKHA, Vladimir A. *Senior Researcher Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tichoretskiy pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

ИЛЬЯШЕНКО Александр Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com

ILYASHENKO, Aleksandr S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com



УДК 004.7

*А.В. Самочадин, С.М. Носницын, П.А. Рогов, И.А. Хмельков***РЕАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕРВИСОВ,
ОСНОВАННЫХ НА МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ,
С ПОМОЩЬЮ MDM СИСТЕМЫ***A.V. Samochadin, S.M. Nosnitsyn, P.A. Rogov, I.A. Khmelkov***IMPLEMENTATION LOCATION-BASED SERVICES ON THE BASE
OF MDM SYSTEM**

Рассмотрены подходы к определению местоположения пользователей корпоративной системы с помощью средств централизованного управления мобильными устройствами (Mobile Device Management). На основе доступной информации о местоположении групп пользователей предложен ряд сервисов, ориентированных на использование в образовательных учреждениях.

МОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ; MOBILE DEVICE MANAGEMENT; МОБИЛЬНЫЕ СЕРВИСЫ.

The article presents the current approaches to determining the location of corporate system's users on the base of Mobile Device Management tools. On the basis of location information offered a number of services targeted for use in educational organizations.

MOBILE TECHNOLOGIES; MOBILE DEVICE MANAGEMENT; LOCATION-BASED SERVICES.

Анализ мировых тенденций использования мобильных технологий показывает актуальность их применения в образовательной деятельности для решения педагогических задач и для организации удаленного доступа к общесетевым и специализированным ресурсам и сервисам учебного заведения. Многие университеты мира активно внедряют различные наборы сервисов [1, 2]. С ростом числа приложений, контента и данных, доступ к которым может осуществляться с самых разнообразных устройств, становится необходимым внедрение средств централизованного управления мобильными устройствами Mobile Device Management (MDM). MDM представляет собой программное обеспечение для работы с корпоративными системами при помощи мобильных устройств, обеспечивающее управление распространением приложений, политиками, безопасностью, предоставляемыми услугами [3]. MDM включает систему функций по защи-

те и управлению данными и приложениями, а также центрально-ориентированную систему информационных функций [4].

MDM системы в основном ориентированы на использование устройств пользователей (концепция «Принеси свое собственное устройство» – Bring Your Own Device (BYOD)) для доступа к корпоративным информационным ресурсам и сервисам организации. MDM, совместно с подходом BYOD, является одним из наиболее перспективных подходов для внедрения мобильных сервисов в образование [5] и позволяет использовать собственные мобильные устройства студентов и сотрудников для реализации новых форм учебной работы, новых вариантов использования образовательного пространства университета, решения современных творческих, педагогических и методических задач.

Одной из существенных возможностей, появляющихся при использовании MDM, является возможность определять место-

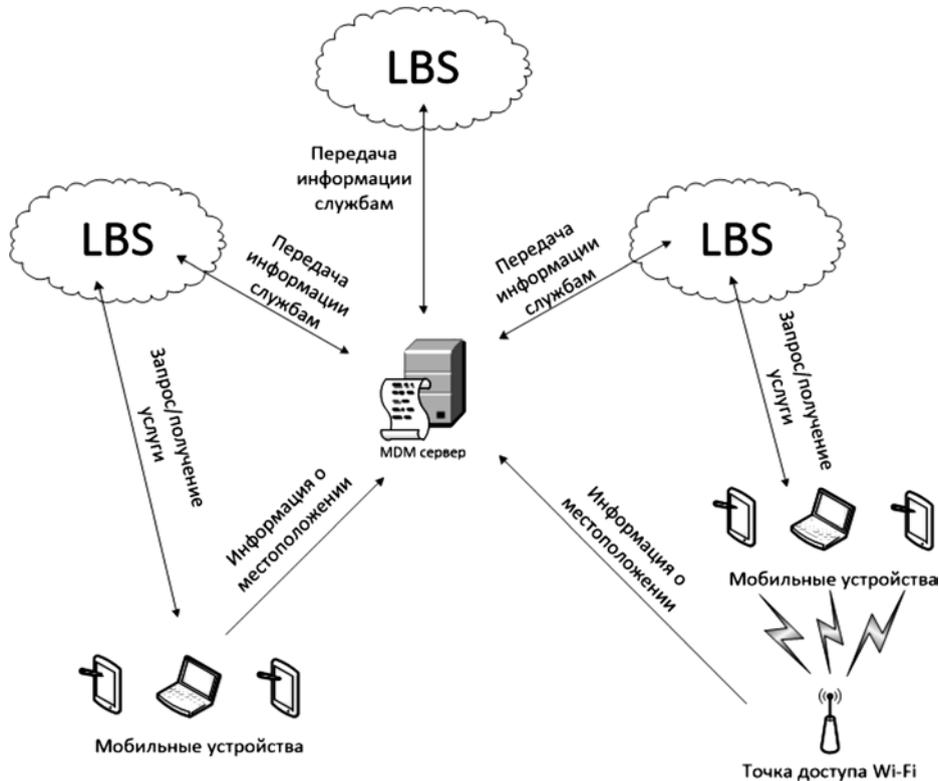


Рис. 1. Общая схема решения по предоставлению сервисов

положение групп пользователей системы и за счет этого реализовывать ряд сервисов, основанных на определении местоположения (Location Based Services – LBS).

В статье рассматриваются подходы к определению местоположения с помощью средств MDM и описываются сервисы, реализуемые с помощью информации о местоположении групп пользователей.

Определение местоположения пользователей мобильных устройств

Общая схема решения по предоставлению сервисов, основанных на местоположении, с помощью средств MDM, приведена на рис. 1. Каждый пользователь идентифицируется с помощью MDM. После этого каждое мобильное устройство сообщает оперативную информацию о местоположении серверу MDM. Сервисы, основанные на местоположении (LBS), используют эту информацию в соответствии со своей функциональностью.

Информация о местоположении пользо-

вателя мобильного устройства может быть получена на основе следующих подходов:

с помощью встроенных средств геопозиционирования мобильной платформы; на основании данных, полученных от внешних технических средств.

Геопозиционирование с помощью встроенных средств мобильной платформы. Основные производители операционных систем (ОС) для мобильных устройств предлагают встроенные возможности геопозиционирования. Для определения местоположения мобильного устройства в этом случае используется специальная программа-агент, обеспечивающая получение данных от мобильной ОС и передачу их на сервер MDM. Следует отметить, что регулярное получение данных о положении мобильного устройства возможно только если программа-агент на мобильном устройстве постоянно активна или периодически автоматически активизируется, в связи с чем возникает необходимость ее запуска в фоновом режиме. Операционные системы трех наиболее рас-

пространственных мобильных платформ (Apple iOS, Google Android, Microsoft Windows Phone) поддерживают возможность фоновое выполнения программ-агентов, зарегистрированных на мобильном устройстве в качестве клиента сервиса геопозиционирования. Операционная система автоматически передает управление такой программе при выполнении любого из следующих условий [6, 7]:

истечение заданного временного интервала;

изменение географического положения мобильного устройства на величину, превышающую заданный порог.

Недостатком этого подхода является то, что передача данных по сетям мобильной связи вызывает ускоренный расход батареи мобильного устройства, поэтому частоту уведомлений сервера об изменении физического местоположения мобильного устройства необходимо устанавливать минимальной, но обеспечивающей в то же время требуемую сервером точность позиционирования устройства.

Геопозиционирование с применением внешних устройств. Подход применяется в основном внутри помещений. Одним из возможных способов геопозиционирования мобильного устройства является монито-

ринг сетей Wi-Fi с последующей привязкой положения мобильного устройства к положению оборудования, в зоне действия которого находится устройство [8].

Здесь можно выделить два основных подхода:

- геопривязку мобильного устройства к положению отдельной точки доступа;
- интегрированные решения, использующие данные, полученные от различного оборудования и сложные расчетные методы.

Геопривязка мобильного устройства к положению отдельной точки доступа. Этот подход к решению предусматривает анализ данных с беспроводных точек доступа сетей Wi-Fi и геопривязку мобильного устройства к точке доступа, к которой оно подключено в данный момент.

Большая часть современных точек доступа позволяют получить информацию о подключенных Wi-Fi устройствах с помощью средств встроенной операционной системы. Для практической реализации такого способа разрабатывается серверный компонент, работающий в корпоративной сети передачи данных. Этот компонент по заданному расписанию устанавливает соединение с точками доступа и отправляет данные о подключенных мобильных

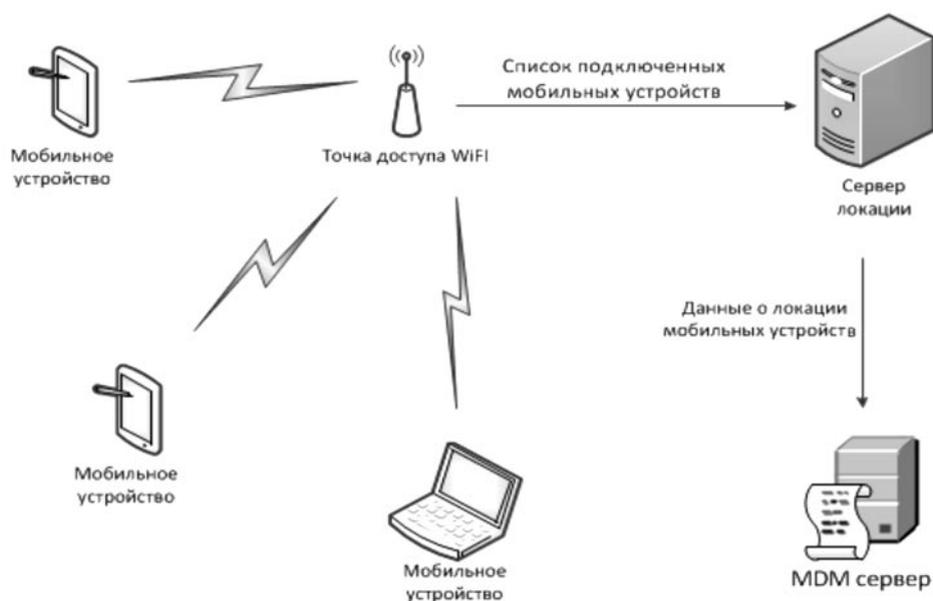


Рис. 2. Геопозиционирование мобильного устройства по данным, полученным с точек доступа

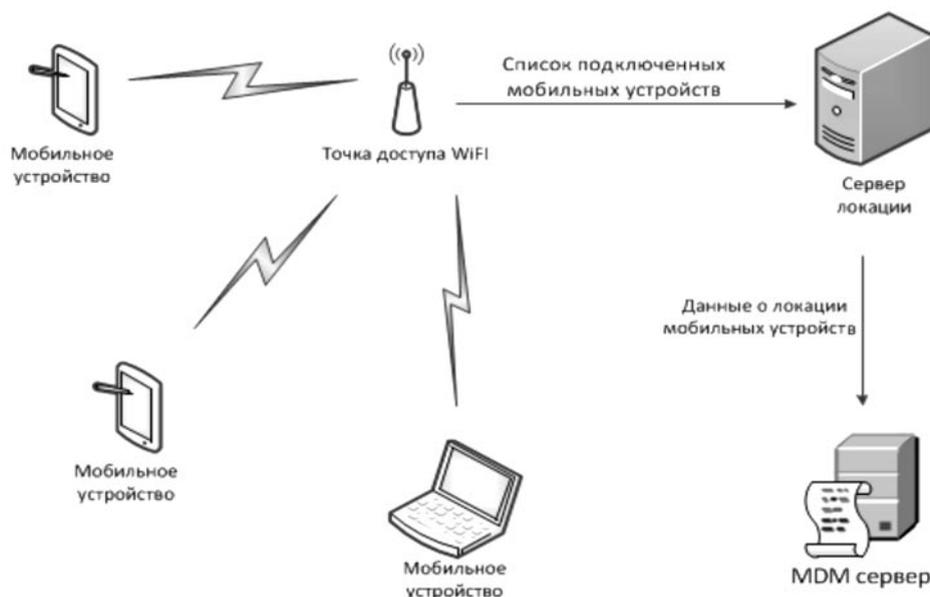


Рис. 3. Геопозиционирование мобильного устройства по данным, полученным с контроллера беспроводной сети

устройствах на MDM сервер, как показано на рис. 2.

Если конфигурация развернутой в организации Wi-Fi сети содержит контроллеры беспроводного доступа, информация о подключенных мобильных устройствах может быть получена непосредственно с контроллера, как это показано на рис. 3.

Третий способ связан с развертыванием в организации централизованного решения, предоставляющего, в том числе возможность определения локации подключенных мобильных устройств средствами беспроводной сетевой инфраструктуры. Например, компания Cisco предлагает использовать для этой цели Mobile Service Engine совместно с Cisco Unified Wireless Network (CUWN) [9, 10]. Это позволяет получить информацию о подключенных мобильных устройствах внутри беспроводной сети, развернутой в помещениях на разных этажах зданий (в т. ч. получать уведомления об изменении положения мобильного устройства). Для более точного определения местоположения подключенного беспроводного устройства используется информация, полученная с различных элементов сетевой инфраструктуры и алгоритм TDOA (Time difference of arrival).

Интегрированные решения, использующие данные, полученные от различного оборудования. Еще одним подходом к геопозиционированию внутри помещений является определение положения мобильного устройства по значениям уровня радиосигнала (Received Signal Strength – RSS) точек доступа, полученным от Wi-Fi модуля мобильного устройства.

Основными способами обработки данных RSS являются метод триангуляции и метод радиопечатков (radio fingerprinting).

Метод триангуляции основывается на известном положении базовых станций (точек доступа) и известной мощности излучаемого ими сигнала; в этих условиях уровень затухания сигнала от разных станций позволяет вычислить положение приемника мобильного устройства. Однако точность такого метода обычно весьма невысока, и он больше подходит для позиционирования по базовым станциям сети сотовой связи.

Метод радиопечатков основан на сравнении значения RSS в данной точке с заранее измеренными значениями в некоторых реперных точках:

1. На этапе калибровки в различных точках пространства измеряется уровень

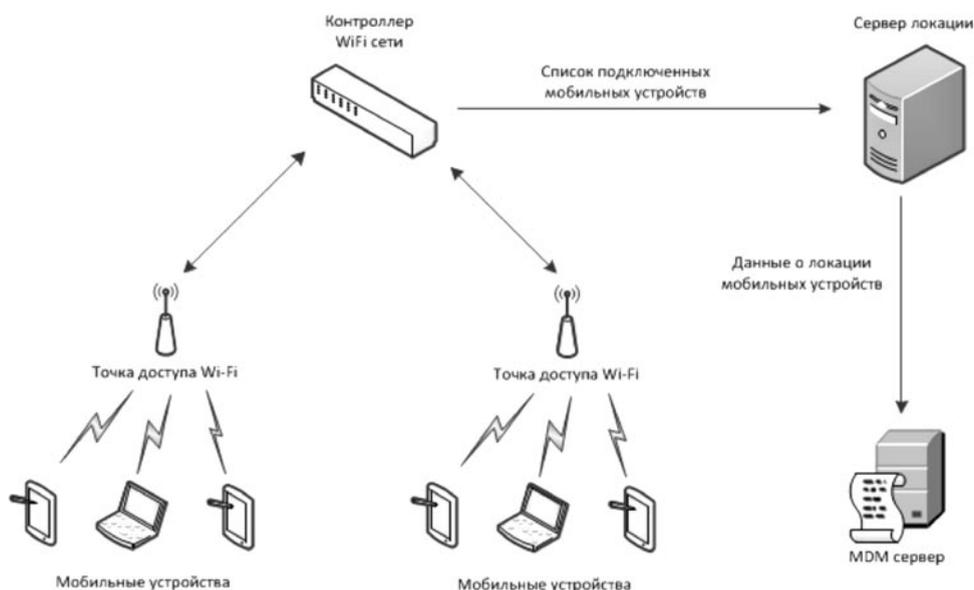


Рис. 4. Геопозиционирование мобильного устройства с использованием Cisco Mobile Service Engine

сигнала доступных Wi-Fi сетей, и составляется радиокарта помещений.

2. На этапе определения местоположения Wi-Fi модуль мобильного устройства используется для измерения текущих уровней сигналов от различных точек доступа, и на основании сравнения полученных данных с радиокартой определяется местоположение мобильного устройства.

Следует иметь в виду, что разработка методов построения радиокарты и расчетных алгоритмов позиционирования по методу радиотпечатков – это сложная научно-техническая задача, решение которой требует больших усилий. Кроме этого, из всех рассматриваемых мобильных платформ только Android предоставляет внешние программные интерфейсы для получения уровня сигнала доступных Wi-Fi сетей, поэтому данный метод нельзя считать универсальным решением.

В работе [11] проведен анализ различных методов позиционирования по Wi-Fi сетям и сделан вывод, что наиболее перспективным является алгоритм сопоставления отпечатков. Однако замечено, что ввиду необходимости длительной калибровки и хранения калибровочной информации, а также статичности карты мощностей сигналов, подразумевающей отсутствие изме-

нений в рабочей среде, данный алгоритм является не вполне адекватным.

Кроме подходов, использующих имеющуюся Wi-Fi инфраструктуру, существуют также решения, основанные на установке дополнительного оборудования, специально предназначенного для обеспечения точного позиционирования мобильных устройств внутри помещений. Примером такого решения является продукт I.T.S. (Indoor Triangulation System) компании Navizon, развертывание которого включает следующие шаги:

1. Установка специализированных Wi-Fi маячков (маячки должны быть размещены на расстоянии 20–50 м друг от друга и покрывать всю площадь помещений, в которых планируется осуществлять геопозиционирование).

2. Составление поэтажных планов помещений и их загрузка на пользовательский портал Navizon.

После выполнения этих действий положение отдельных мобильных устройств может быть определено с помощью облачного веб-сервиса, развернутого компанией Navizon.

Таким образом, указанные подходы позволяют иметь информацию о местоположении пользователей MDM системы.

Используя эту информацию, можно реализовать как традиционные сервисы, основанные на местоположении пользователя сервиса, так и сервисы, основанные на информации о местоположении групп пользователей.

Сервисы, основанные на местоположении

В работах [5, 12] рассмотрены и классифицированы мобильные сервисы, применяемые в образовании. Анализ этих работ и сервисов, предоставляемых ведущими университетами мира (например: Massachusetts Institute of Technology, Stanford university, Harvard university), позволяет выделить для образовательных учреждений следующие основные категории сервисов, основанных на местоположении:

экстренные службы (применяются в чрезвычайных ситуациях, когда человек не может или не в состоянии сам определить свое местоположение):

массовое оповещение, информирование пользователей (с учетом их реального местоположения);

навигационные услуги (удовлетворение потребностей пользователей в определении направления движения от текущего местоположения):

справочная информация о маршрутах по территории образовательного учреждения (с учетом информации о различных видах ограничений: ремонты; проведение мероприятий, затрудняющих проход; пробки и т. д.);

информационные услуги (мобильные желтые страницы, сообщения о событиях, происходящих рядом):

справочная информация о ближайших объектах (аудиториях, столовых, кафе и т. д.);

справочная информация о проводящихся рядом мероприятиях (семинарах, конференциях и т. д.);

рекламные услуги (предоставление рекламодателям доступ к персонифицированной целевой аудитории, расположенной в заданном месте):

поступающая на мобильные устройства реклама спонсоров университета рядом с лабораториями, оборудованными на спон-

сорские деньги;

услуги по отслеживанию (отслеживание местоположения пользователей):

автоматическое определение списка лиц, присутствующих на мероприятии (лекции, семинаре, совещании и т. д.), на основе реального местоположения участников;

социальные сети с возможностью получения информации о местоположении участников (пользователи могут объединяться в виртуальные группы и видеть на своих мобильных устройствах местоположение участников этих групп);

биллинговые услуги (динамические расценки на услуги или контент в зависимости от местоположения пользователя):

получение доступа к электронным библиотечным фондам на мобильном устройстве в библиотеке бесплатно, а вне ее — по подписке.

Все указанные сервисы могут быть реализованы в рамках предлагаемого подхода.

Помимо перечисленных выше сервисов, для которых достаточно знать местоположение пользователя, применение средств централизованного управления мобильными устройствами позволит добавить дополнительные виды услуг, такие, как

- автоматическая регистрация на занятиях и мероприятиях (на основе реального местоположения);

- автоматизированная блокировка и разблокировка сенсоров мобильных устройств в соответствии с проводимыми образовательными мероприятиями (на основе местоположения, расписания);

- беспроводное подключение к расположенным поблизости устройствам (принтерам, проекторам, к различным мультимедийным устройствам);

- беспроводное подключение в образовательных и исследовательских целях к расположенным поблизости измерительным приборам/сенсорам.

Использование мобильных устройств в образовательных целях — это уже реальность. Многие университеты мира уже начали внедрять системы, позволяющие студентам использовать мобильные устрой-



ства в процессе обучения. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение услуг, предоставляемых обучающимся на основе их местоположения. В статье предложены подходы к определению местоположения как для отдельных пользователей, так и для групп пользователей, основанные на технологии централизованного управления мобильными устрой-

ствами. На основе доступной информации о местоположении групп пользователей предложен ряд новых сервисов для образовательных учреждений.

Разработка ПО для систем централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках совместного проекта компании IBS (Москва) и СПбГПУ (Санкт-Петербург). Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lennon Ruth** Bring Your Own Device (BYOD) with Cloud 4 Education // Proc. of the 3rd Annual Conf. on Systems, Programming and Applications: Software for Humanity. SPLASH '12. – 2012. – P. 171–180.

2. **Wilson S., McCarthy G.** The mobile university: from the library to the campus // Reference Services Review. – 2010. – № 38(2). – P. 214–225.

3. Gartner IT-glossary [электронный ресурс]/ URL: <http://www.gartner.com/it-glossary/mobile-device-management-mdm/>

4. CLOUD SECURITY ALLIANCE Управление мобильными устройствами: Основные компоненты, V1.0, Сентябрь 2012 [электронный ресурс]/ URL: http://www.niisokb.ru/news/documents/Cloud%20Security%20Alliance_Mobile%20Device%20Management%20Key%20Components.pdf

5. **Emery S.** Factors for consideration when developing a bring your own device (BYOD) strategy in higher education [электронный ресурс]/ URL: <http://hdl.handle.net/1794/12254> (retrieved July 26, 2012 from Un-ty of Oregon).

6. Apple Inc. Location Awareness Programming Guide [электронный ресурс]/ URL: <http://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/LocationAwarenessPG/LocationAwarenessPG.pdf> (дата обращения 2012).

7. Microsoft Corporation. Running location-tracking apps in the background for Windows Phone 8 [электронный ресурс]/ URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windowsphone/develop/>

[jj681691\(v=vs.105\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windowsphone/develop/jj681691(v=vs.105).aspx) (дата обращения 2013).

8. 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 2012).

9. International Data Corporation. Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker. Top Five Smartphone Operating Systems, Shipments and Market Share, 1Q 2013 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24108913> (дата обращения 2013).

10. HI-TECH@mail.ru. Доля Android в российских поставках смартфонов достигла рекордных 70,9 % [электронный ресурс]/ URL: http://hi-tech.mail.ru/news/misc/android_russia.html (дата обращения 2013).

11. **Миниахметов Р.М., Рогов А.А., Цымблер М.Л.** Обзор алгоритмов локального позиционирования для мобильных устройств // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 83–96.

12. **Иванченко Д.А., Хмельков И.А., Райчук Д.Ю., Митрофанов А.М., Самочадин А.В., Рогов П.А.** Применение подходов BYOD для построения стратегии информатизации высшего учебного заведения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – № 3(174). – С. 85–92.

REFERENCES

1. **Lennon Ruth** Bring Your Own Device (BYOD) with Cloud 4 Education / Proc. of the 3rd Annual Conf. on Systems, Programming and Applications: Software for Humanity. SPLASH '12. – 2012. – P. 171–180.

2. **Wilson S., McCarthy G.** The mobile university: from the library to the campus / Reference Services Review. – 2010. – № 38(2). – P. 214–225.

3. Gartner IT-glossary. Available <http://www.gartner.com/it-glossary/mobile-device-management-mdm/>

4. CLOUD SECURITY ALLIANCE Управление мобильными устройствами: Основные компоненты, V1.0, Сентябрь 2012. Available http://www.niisokb.ru/news/documents/Cloud%20Security%20Alliance_Mobile%20Device%20Management%20Key%20Components.pdf

5. **Emery S.** Factors for consideration when developing a bring your own device (BYOD) strategy in higher education. Retrieved July 26, 2012 from University of Oregon: <http://hdl.handle.net/1794/12254>

6. Apple Inc. Location Awareness Programming Guide. Available <http://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/LocationAwarenessPG/LocationAwarenessPG.pdf> (Accessed 2012).

7. Microsoft Corporation. Running location-tracking apps in the background for Windows Phone 8. Available [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windowsphone/develop/jj681691\(v=vs.105\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windowsphone/develop/jj681691(v=vs.105).aspx) (Accessed 2013).

8. 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> (Accessed 2012).

9. International Data Corporation. Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker. Top Five Smartphone Operating Systems, Shipments, and Market Share, 1Q 2013. Available <http://www.idc.com/>

[getdoc.jsp?containerId=prUS24108913](#) (Accessed 2013).

10. HI-TECH@mail.ru. Dolya Android v rossiyskikh postavkakh smartfonov dostigla rekordnykh 70,9 %. Available http://hi-tech.mail.ru/news/misc/android_russia.html (Accessed 2013).

11. **Miniakhmetov R.M., Rogov A.A., Tsymler M.L.** Obzor algoritmov lokalnogo pozitsionirovaniya dlya mobilnykh ustroystv / Vestnik YuUrGU. Ser. Vychislitel'naya matematika i informatika. – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 83-96. (rus)

12. **Ivanchenko D.A., Khmelkov I.A., Raychuk D.Yu., Mitrofanov A.M., Samochadin A.V., Rogov P.A.** Primeneniye podkhodov BYOD dlya postroyeniya strategii informatizatsii vysshego uchebnogo zavedeniya / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. – № 3(174). – С. 85–92. (rus)

САМОЧАДИН Александр Викторович – профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

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

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

SAMOCHADIN, Aleksandr V. St. Petersburg State Polytechnical University.

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

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

НОСНИЦЫН Семен Михайлович – аспирант кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: semen.nosnitsyn@gmail.com

NOSNITSYN, Semen M. St. Petersburg State Polytechnical University.

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

E-mail: semen.nosnitsyn@gmail.com

РОГОВ Петр Александрович – заместитель начальника организационного отдела департамента научно-организационной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

ROGOV, Petr A. St. Petersburg State Polytechnical University.

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

E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

ХМЕЛЬКОВ Игорь Александрович – директор по консалтингу IBS.

127434, Россия, Москва, Дмитровское ш., д. 9Б.

E-mail: IKhmelkov@ibs.ru

KHMELKOV, Igor A. IBS.

127434, Dmitrovskoe Sh., Moscow, Russia.

E-mail: IKhmelkov@ibs.ru

УДК 519.248

В.С. Заборовский, А.С. Ильяшенко, В.А. Мулюха

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОТОКОВ
ПАКЕТНЫХ ДАННЫХ В СЕТЕВОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИОРИТЕТНОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ВЫТАЛКИВАЮЩЕГО
МЕХАНИЗМА**

V.S. Zaborovsky, A.S. Ilyashenko, V.A. Muliukha

**CHARACTERISTICS OF THE PACKET DATA FLOWS CONTROL
ALGORITHM IN A NETWORK ENVIRONMENT BASED ON PRIORITY
PROBABILISTIC PUSH-OUT MECHANISM**

Изучены методы управления характеристиками сетевого трафика с использованием приоритетного вероятностного механизма обработки пакетных данных. На примере двухпоточковой системы массового обслуживания (СМО) с ограниченным объемом буферной памяти и алгоритмом обработки пакетов, параметром которого является вероятность вытеснения неприоритетного требования и его замещение приоритетным, исследованы статистические характеристики системы с приоритетным обслуживанием заявок, совокупность которых управляет режимом функционирования моделей телематических устройств. Предложен способ обобщения решения, полученного для двухпоточковых СМО, на многопоточковые режимы функционирования, которые характерны для современных сред облачных вычислений и киберфизических систем класса «internet of things». Рассмотренные алгоритмы применяются на третьем уровне иерархической модели управления сетевыми объектами, описанной в статье «Сетецентрический подход к созданию системы удаленного управления робототехническими объектами с борта орбитальной станции», опубликованной в данном номере журнала. В этой модели информационное взаимодействие с объектами управления осуществляется с помощью динамически формируемых виртуальных соединений.

СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ; ПРИОРИТЕТНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ; УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ; ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ВЫТАЛКИВАЮЩИЙ МЕХАНИЗМ; ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; GPSS.

This article focused on control methods for characteristics of packet network traffic based on prioritization and probabilistic push-out mechanism. On the example of two-flow queuing system (QS) with a limited amount of buffer memory and packets processing algorithm with a replacement probability of non-priority packet by priority packets parameter studied statistical characteristics of a QS with prioritized packets processing. Proposed a way to summarize obtained results for multi-flow QS of the same type, which are used in modern cloud computing environments and cyber-physical systems of class like «internet of things». Considered algorithms are applied on the third level of hierarchical model of robotic remote control system, described in article «Network-centric approach to creating a remote control system for a robotic object from a board of an orbital station» in this issue of this journal. In this model for communicating with robot are used dynamically generated virtual connections.

QUEUEING SYSTEMS; PRIORITIZED DATA PROCCESING; REMOTE ROBOTIC CONTROL; PROBABILISTIC PUSH-OUT MECHANISM; SIMULATION MODEL; GPSS.

Сетецентрические подходы к организации информационного взаимодействия становятся доминирующими методами организации сложных технических систем, чьи функциональные возможности реализуются за счет использования принципов самоорганизации и адаптации к изменяющимся условиям функционирования, модельное описание которых носит стохастический характер. Для обеспечения робастности таких систем большое значение имеют алгоритмы управления различными потоками данных, которые используются для передачи информации как о состоянии среды функционирования и организации обратных связей между исполнительными механизмами и устройствами задающих воздействий, так и для контроля качества выполнения последовательностей операций, реализующих выбранную стратегию управления.

Важным направлением практического использования сетецентрических систем являются космические проекты, связанные с использованием группировок напланетных роботов для проведения геологических исследований поверхности планет или выполнения сервисных операций при обслуживании автономных или пилотируемых орбитальных станций. В таких системах объекты управления функционируют в экстремальных средах, что приводит к необходимости решения задач класса фильтрации потоков данных при условиях многофакторных ограничений, в т. ч. стохастических, накладываемых на характеристики используемой среды передачи информации.

Поэтому разработка и исследование моделей управления потоками данных, позволяющих оперативно оценить характеристики пропускной способности и величины задержек пакетов в различных условиях функционирования с учетом приоритетов в решении заданного множества сервисных задач, является актуальной научно-технической задачей.

Исследование подобных моделей может быть полезно не только в космической робототехнике, но и при создании систем защиты информации в среде облачных вычислений, в условиях, когда правила контроля доступа к информационным ре-

сурсам должны генерироваться в режиме реального времени в результате изменения конфигурации виртуальных машин или их миграции в соответствии с выбранными критериями или классами сервисов [8].

Примером такой задачи является приоритетное управление процессами передачи данных на прикладном уровне межсетевого взаимодействия в соответствии с выбранной политикой информационной безопасности, которая реализуется с помощью межсетевых экранов, функционирующих в режиме скрытной фильтрации.

В общем случае областью применения разработанных моделей могут стать любые системы, в которых критерии функционирования формируются путем задания приоритетов обработки потоков данных, приходящих от нескольких источников и имеющих различную «степень важности» для решения многоцелевых задач управления.

Однако для проведения полноценного исследования разработанных моделей требуется использовать математические методы, позволяющие описать систему с заданным уровнем точности и формализовать происходящие процессы так, учитывая специфику прикладного использования создаваемой системы. Для этих целей в работе предлагается использовать аппарат теории массового обслуживания и модели процессов, отражающие особенности современных технологий информационного взаимодействия, основывающиеся на принципах коммутации пакетов и статистического мультиплексирования данных. Исследование подобных моделей осложняется трудностью их полноценного аналитического описания.

Именно в виду сложности применяемого математического аппарата в теории СМО хорошо исследованы однопотоковые модели с различными ограничениями, накладываемыми на процесс функционирования системы, например, такими, как объем буферной памяти, различные законы распределения времени обслуживания, различные законы распределения временных интервалов между поступлениями требований, многоканальная обработка информа-

ции, количество источников информации.

Формально существует огромное количество вариантов по усложнению простейших однопоточковых моделей СМО. Это можно сделать, например, за счет задания различных законов распределения входящих потоков или времени обслуживания, а также введения различных выталкивающих механизмов или приоритизации процессов обслуживания. Именно последние два способа анализируются ниже. В статье подробно исследуется модель двухпоточковой системы с ограниченным объемом буферной памяти, вероятностным выталкивающим механизмом, зависящим от вероятности вытеснения из очереди неприоритетного требования приоритетным, а также рассматривается возможность перенесения полученных результатов на многопоточковые режимы функционирования СМО.

Описание рассматриваемой модели

Приоритетные СМО занимают особое место в теории массового обслуживания. Такие модели позволяют строить системы, в которых требуется передавать (обслуживать) данные различной важности. Но рассмотрение СМО только с приоритетами имеет смысл при потоках данных слабой интенсивности, поскольку при больших нагрузках эффект приоритизации будет незаметен из-за постоянной заполненности системы. В реальной жизни это не всегда так, например, в компьютерных сетях. Для решения данной проблемы в модель добавляют выталкивающий механизм, позволяющий ввести способ выталкивания неприоритетных требований из системы с целью освобождения места для требования с более высоким приоритетом.

Для удобства описания рассматриваемой системы массового обслуживания, рассмотрим общее обозначение для этого класса систем. Используя стандартную нотацию Кендалла [1] и ее модификацию Г.П. Башариным [2], поясним обозначение систем массового обслуживания из класса $\overline{M}_2 / \underline{M} / 1 / k / f_i^j$. Первый векторный символ \overline{M}_2 означает, что обслуживаются два простейших потока требований. Второй символ \underline{M} обозначает обслуживание

по показательному закону. И так как здесь стоит скалярный, а не векторный символ, то оба потока обслуживаются с одинаковой интенсивностью. Стоящая на третьем месте цифра 1, указывает количество каналов обслуживания, а k – емкость системы. Предполагается, что накопитель общий для обоих типов требований. Символ f описывает тип приоритета в системе и способ выталкивания заявок из системы. Нижний индекс i задает тип приоритета ($i = 0$ – без приоритета, $i = 1$ – с относительным приоритетом, $i = 2$ – абсолютный приоритет). Верхний индекс j определяет тип выталкивающего механизма, который действует в полностью заполненном накопителе при поступлении нового приоритетного требования. При $j = 0$ выталкивающий механизм не действует (т. е. требование безусловно теряется), $j = 2$ – детерминированный механизм, согласно которому всегда вытесняется требованием с меньшим приоритетом. Если обратить внимание на индекс j , то можно заметить, что значение, равное единице, для него не было использовано. Это заметил Н.О. Вильчевский, предложивший использовать данное обозначение для вероятностного выталкивающего механизма. Последний был впервые исследован в [3] и является неким промежуточным между двумя другими видами выталкивающего механизма.

Рассмотрим двухпоточковую СМО, схема которой изображена на рис. 1. В соответствии с модифицированной системой обозначений многопоточковых СМО, подробно описанной ранее, данная система работает следующим образом. На вход поступают два независимых простейших потока требований интенсивностью λ_1 и λ_2 . Длительность обслуживания любого требования распределена по показательному закону с параметром μ , одинаковым для всех требований, причем все эти длительности независимы в совокупности. На рисунке $a_i(\tau)$ и $b_i(x)$ обозначают, соответственно, законы распределения интервала между требованиями и времени обслуживания для i -го потока.

Система снабжена вероятностным выталкивающим механизмом, который дает преимущество при постановке в очередь

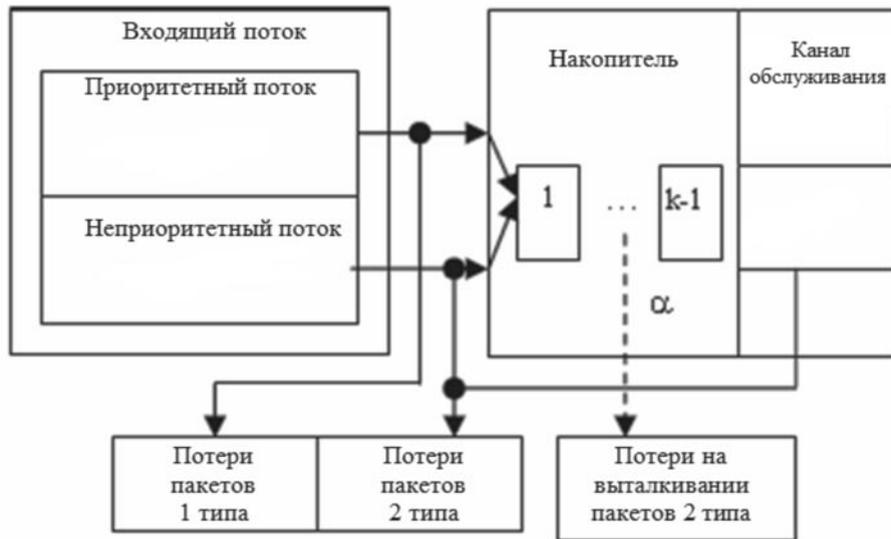


Рис. 1. Схема системы массового обслуживания класса $\overline{M}_2 / M / 1 / k / f_2^1$

требованиям первого типа. Если все места ожидания заняты, причем в накопителе имеются требования второго типа, то вновь подошедшее требование первого типа имеет право с заданной вероятностью α вытеснить из накопителя какое-либо требование другого типа. Вытесненные требования теряются и присоединяются к потоку потерь.

Накопитель имеет $k-1$ место ожидания, так что общая емкость системы, включая один канал обслуживания, составляет k . Накопитель является общим, свободные места ожидания полностью доступны для любого вновь поступающего требования. Динамически формируются две очереди, их общая длина не превосходит $k-1$.

В рамках данной работы требуется дополнить результаты, полученные ранее при помощи метода производящих функций для финальных вероятностей состояний системы, описывающих поведение системы при наступлении в системе установившегося режима. Недостатком этого решения является то, что финальные вероятности не дают никакой информации о поведении системы на начальном этапе ее работы. В качестве продолжения решения задачи было принято решение об использовании метода имитационного моделирования и среды имитационного моделирования GPSS, предназначенной для моделирования тако-

го рода систем.

Для завершения исследования системы требуется получить оценку характеристик системы на этапе начала ее функционирования, что является необходимой информацией для организации стабильности передачи данных, в частности, проведения экспериментов по удаленному управлению.

В данной статье приведены результаты предыдущего этапа для проведения качественного сравнения теоретических результатов с результатами имитационного моделирования. В качестве основных параметров для сравнения выбраны вероятности потери приоритетных и неприоритетных требований при различных уровнях загруженности системы. Данные вероятности при помощи имитационной модели вычисляются как отношение количества потерянных транзактов к количеству созданных транзактов определенного типа на входе системы.

Имитационная модель в среде GPSS World

Для получения экспериментальных результатов разработана имитационная модель рассматриваемой системы в среде моделирования GPSS World. Данная модель позволяет провести процесс моделирования работы рассматриваемой системы массового обслуживания и получить интересные

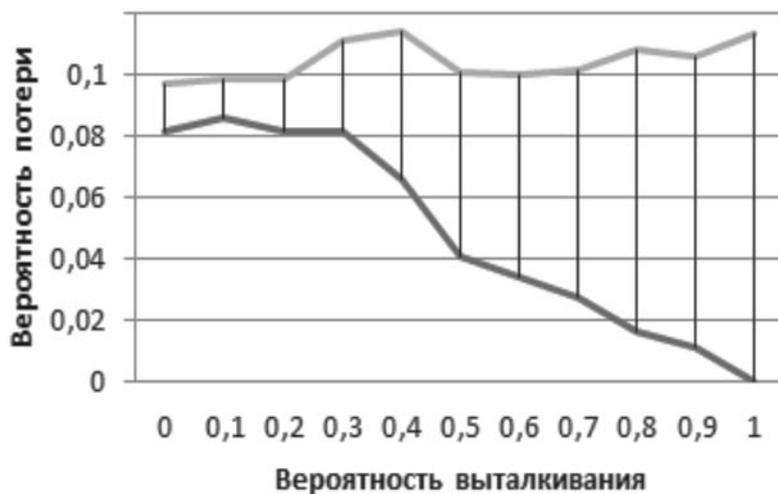


Рис. 2. Вероятность потери требований при слабой загрузке системы приоритетными требованиями ($\rho_1 = 0,2$; $\rho_2 = 0,9$)
 (—) пакеты с приоритетом; (---) пакеты без приоритета

характеристики вероятностей потерь.

В среде моделирования GPSS World результаты представляются в виде отчетов, в которых отражается статистика движения транзактов по имитационной модели, и представляются основные характеристики элементов системы, например, таких, как очереди и обслуживающие устройства. Эти отчеты громоздки, поэтому в данной статье будут приведены только численные резуль-

таты моделирования для исследуемых характеристик.

На рис. 2 и 3 приведены результаты одного из процессов моделирования системы со слабой нагрузкой ($\rho_1 = 0,2$, $\rho_2 = 0,9$). В этом случае система получает на вход малое количество приоритетных требований, а поток неприоритетных требований практически близок к пропускной способности системы. В табл. 1 приведены численные

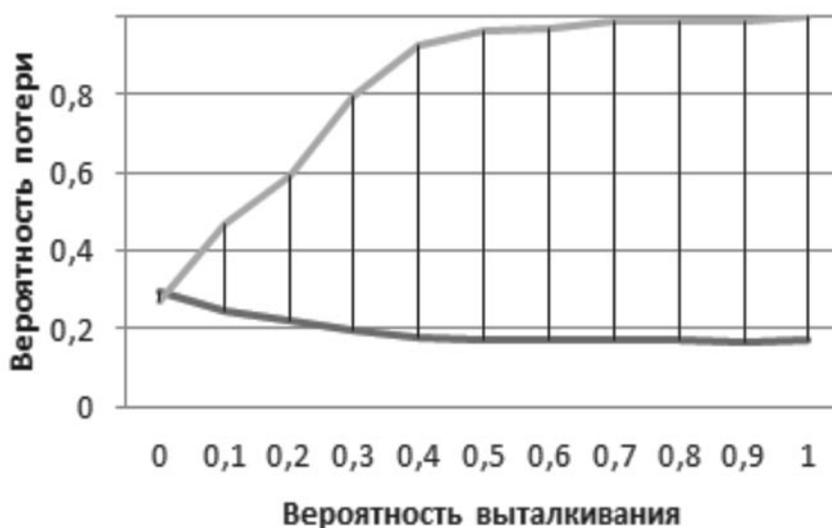


Рис. 3. Вероятность потери требований при сильной загрузке системы приоритетными требованиями ($\rho_1 = 1,2$; $\rho_2 = 0,2$)
 (—) пакеты с приоритетом; (---) пакеты без приоритета

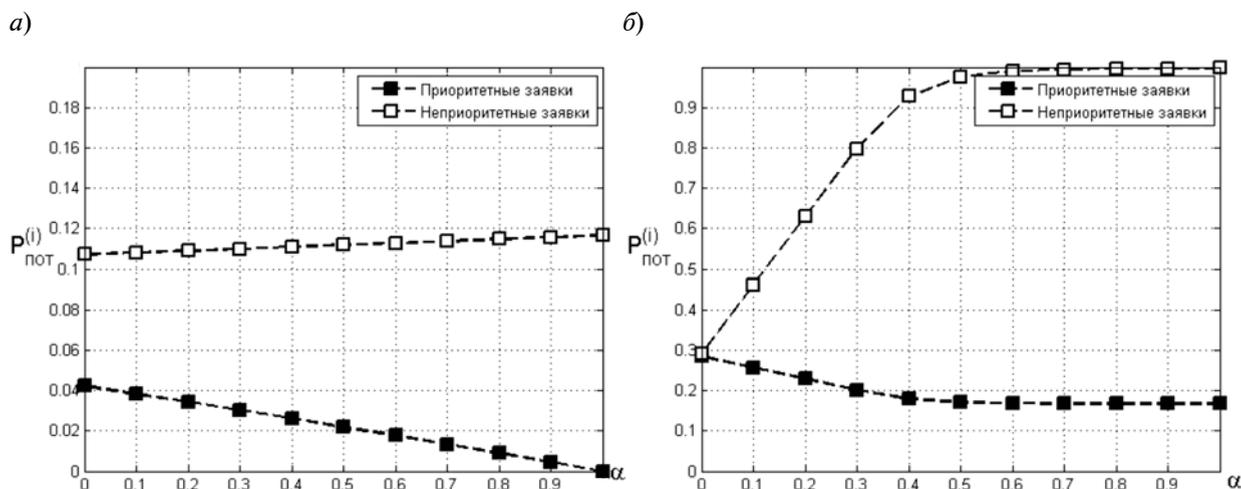


Рис. 4. Вероятность потери требований:

a – для слабой загрузки ($\rho_1 = 0,2; \rho_2 = 0,9$);

б – для сильной загрузки приоритетными требованиями ($\rho_1 = 1,2; \rho_2 = 0,2$)

результаты моделирования, при помощи которых построены зависимости на рис. 2 и 3. На рис. 4 приведены зависимости, полученные аналитически в ранних работах [4, 6–7]. Из графиков видно, что на начальном этапе работы система ведет себя так же, как и в установившемся режиме, что подтверждается схожестью графиков на рис. 2 и 3 с данными на рис. 4.

В табл. 1 и 2 приведены результаты моделирования процесса функционирования системы, при помощи которых построены

зависимости на рис. 2 и 3. Таблицы содержат данные о количестве созданных транзактов различных типов на входе модели и количестве потерь, которые произошли в процессе функционирования системы.

Области возможного применения модели

Основным современным приложением результатов работы является телематика. Исследование процесса функционирования телематических устройств – важная задача. От тщательности исследования за-

Таблица 1

Результаты моделирования для слабой загрузки системы

Вероятность выталкивания	Слабая загрузка системы					
	Пакетов 1 типа	Потери	Вероятность потери	Пакетов 2 типа	Потери	Вероятность потери
0	1791	145	0,0809	8228	795	0,0966
0,1	1833	157	0,0856	8185	802	0,0980
0,2	1791	145	0,0809	8233	810	0,0983
0,3	1820	148	0,0813	8191	907	0,1107
0,4	1836	120	0,0653	8177	931	0,1138
0,5	1789	73	0,0408	8220	828	0,1007
0,6	1783	61	0,0342	8229	821	0,0997
0,7	1771	48	0,0271	8239	832	0,1009
0,8	1771	28	0,0158	8249	893	0,1082
0,9	1765	19	0,0107	8255	873	0,1057
1	1820	0	0	8203	929	0,1132

Таблица 2

Результаты моделирования для слабой загрузки системы

Вероятность выталкивания	Сильная загрузка системы					
	Пакетов 1 типа	Потери	Вероятность потери	Пакетов 2 типа	Потери	Вероятность потери
0	8624	2531	0,2934	1406	378	0,2688
0,1	8585	2110	0,2457	1444	679	0,4702
0,2	8581	1871	0,2180	1450	854	0,5889
0,3	8592	1660	0,1932	1430	1139	0,7965
0,4	8593	1498	0,1743	1437	1332	0,9269
0,5	8598	1464	0,1702	1433	1379	0,9623
0,6	8597	1477	0,1718	1430	1385	0,9685
0,7	8591	1453	0,1691	1430	1407	0,9839
0,8	8591	1449	0,1686	1430	1411	0,9867
0,9	8596	1431	0,1664	1431	1413	0,9874
1	8591	1497	0,1742	1436	1434	0,9986

висит качество предоставляемых услуг, например, по каналам сети Интернет или по линиям телефонной связи. Так, данные модели имеет смысл применять в устройствах, играющих роль «фильтра» на входе какой-нибудь корпоративной сети или управляемого устройства. В качестве практического применения исследуемых моделей предполагается их использование в межсетевых экранах отечественного производства модели «ССПТ-2» и других моделях, производимых фирмами ЗАО «НПО РТК» и ООО «ФРАКТЕЛ» [9].

Еще одной областью применения является удаленное управление по общедоступным каналам связи. Обычно любой процесс управления сопровождается обратной связью с управляемым устройством. Например, передача данных телеметрии и видеосигнал с информацией, в которой функционирует управляемый объект. В таком случае требуется определять приоритеты между ними и порядок обработки этих данных, а также осуществлять балансировку этих потоков. В исследованной модели эти два потока данных могут быть учтены и может быть осуществлена их приоритетная обработка. Одним из таких процессов является космический эксперимент по удаленному управлению роботом на поверхности планеты оператором, находящимся на бор-

ту Международной космической станции (МКС) «Контур-2». Канал связи МКС имеет ограниченную пропускную способность. Чтобы учесть это ограничение, будет использоваться исследованная модель [5, 10]. Схема эксперимента изображена на рис. 5. На данной схеме моделируемое устройство может быть расположено на борту МКС и должно управлять процессом подготовки данных для передачи на поверхности планеты по каналу связи с ограниченной пропускной способностью. Подробности системы управления приведены в статье «Сетецентрический подход к созданию системы удаленного управления робототехническими объектами с борта орбитальной станции», публикуемой в данном выпуске журнала.

Рассматриваемые модели пригодны для использования при управлении потоками данных в таких сервисах, как Skype. Для обеспечения заданного уровня качества передачи видео- или аудиосигнала требуется определить приоритет и иметь возможность динамической настройки процесса передачи информации. Рассматриваемые модели не предоставляют возможности избежать потерь передаваемых данных, но позволяют хотя бы минимизировать их. Результаты, приведенные в этой статье, подтверждают возможность использования моделей

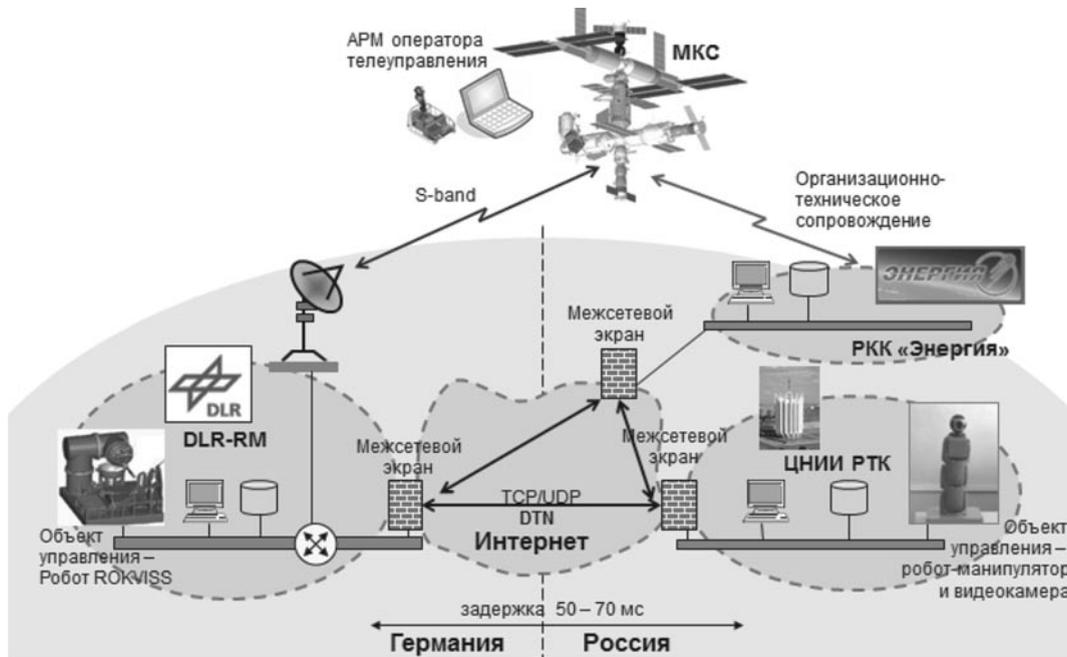


Рис. 5. Схема космического эксперимента «Контур-2»

и на начальном этапе сеанса связи пользователей.

Обобщение модели на случай большого количества потоков данных

Результаты данной работы могут использоваться не только в случае систем с двумя потоками. Пусть в системе имеется большое количество потоков данных. Анализируя данные этих потоков, им можно расставить различные приоритеты. Далее требуется выделить наиболее приоритетные потоки и объединить их в один приоритетный поток, который имеет суммарную интенсивность этих потоков, а все остальные потоки объединяются в неприоритетный поток, тоже с суммарной интенсивностью. Таким образом, система сводится к системе с двумя потоками, и результаты данной работы могут использоваться для оценки характеристик подобных систем.

В теории машинного обучения применяется стандартный подход «один против всех» (one-vs-all), позволяющий решать задачи классификации не только с двумя ответами «да» и «нет», но и с любым количеством. Используя такой подход, мы выделяем один исследуемый поток в системе

и рассматриваем его как приоритетный. Все остальные потоки объединяются в другой неприоритетный поток данных. Также можно рассмотреть противоположный вариант, когда интересующий поток выделяется как неприоритетный, а остальным ставится приоритет. Тогда с использованием исследованной модели можно получить результаты влияния на систему выбранного потока данных на фоне остальных.

В статье исследован метод управления характеристиками сетевого трафика с использованием приоритетного вероятностного механизма обработки пакетных данных. На примере двухпоточковой системы массового обслуживания (СМО) с ограниченным объемом буферной памяти и алгоритмом обработки пакетов, параметром которого является вероятность вытеснения неприоритетного требования и его замещение приоритетным, исследованы вероятности потери требований в системе с приоритетным обслуживанием заявок. Предложен способ обобщения решения, полученного для двухпоточковых СМО, на многопоточковые режимы функциони-

рования, характерные для современных сложных систем. С этой целью разработан алгоритм декомпозиции многопоточковых процессов передачи пакетного трафика, позволяющий исследовать характеристики как отдельных, так и агрегированных потоков данных, исходя из «степени их важности» с точки зрения решаемой задачи управления. В его основе лежит идея стандартного подхода «one-vs-all».

В данной статье приведено сравнение результатов предыдущего этапа исследований аналитическими методами и результатов текущего этапа, в котором была построена имитационная модель в среде GPSS World для получения вероятностных

характеристик исследуемой системы.

Одно из основных достоинств данной модели – простой и эффективный способ управления характеристиками модели, не зависящий от типа входных или выходных данных, а только влияющий на поведение системы. Этим способом является изменение вероятности выталкивания неприоритетного требования приоритетным из системы в случае ее переполнения. Также в статье описан круг задач, в которых возможно применение рассматриваемой модели и использование предлагаемого способа управления моделью позволит эффективно управлять качеством передачи данных по каналам связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.

2. Башарин Г.П. Некоторые результаты для систем с приоритетами // Массовое обслуживание в системах передачи информации. – М.: Наука, 1969. – С. 39–53.

3. Avrachenkov K.E., Vilchevsky N.O., Shevlyakov G.L. Priority queueing with finite buffer size and randomized push-out mechanism // Proc. of the ACM Internat. Conf. on measurement and modelling of computer. – San Diego: ACM, 2003. – P. 324–335.

4. Zaborovsky V., Mulyukha V., Pyashenko A., Zayats O. Access control in a form of active queueing management in multipurpose operation networks // Internat. J. on Advances in Networks and Services. – 2011. – Vol. 4. – № 3 & 4. – P. 363–374.

5. Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Силенко А.В., Мулюха В.А., Ильяшенко А.С., Филиппов М.С. Удаленное управление робототехническими объектами в космических экспериментах серии «Контур» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 6(162). – С. 23–32.

6. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах

с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 1 // Программная инженерия. – 2012. – № 2. – С. 22–28.

7. Заяц О.И., Заборовский В.С., Мулюха В.А., Вербенко А.С. Управление пакетными коммутациями в телематических устройствах с ограниченным буфером при использовании абсолютного приоритета и вероятностного выталкивающего механизма. Ч. 2 // Программная инженерия. – 2012. – № 3. – С. 21–29.

8. Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kuprenko Sergey, Mulyukha Vladimir. Dynamic Access Control in Cloud Services // Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – Dec. 2011. – Vol. 7. – № 3/4. – P. 264–277.

9. Zaborovsky Vladimir S., Kuprenko Sergey V., Shemanin Yuri A. Secure computer network with a network screen // Патент US 7281129.

10. Заборовский В.С., Кондратьев А.С., Мулюха В.А., Силенко А.В., Ильяшенко А.С. Управление группировками напланетных роботов с борта пилотируемой орбитальной станции в рамках проекта «METERON» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – № 6(162). – С. 59–66.

REFERENCES

1. Kleinrock L. Teoriya massovogo obslugivaniya. – Moscow: Mashinostroenie, 1979. (rus)

2. Basharin G.P. Nekotorie rezultati dlya sistem s prioritetami / Massovoe obslugivanie v sistemah peredachi informacii. – Moscow: Nauka, 1969. – S. 39–53. (rus)

3. Avrachenkov K.E., Vilchevsky N.O., Shevlyakov G.L. Priority queueing with finite buffer

size and randomized push-out mechanism / Proc. of the ACM Internat. Conf. on measurement and modeling of computer. – San Diego: ACM, 2003. – P. 324–335.

4. Zaborovsky V., Mulyukha V., Pyashenko A., Zayats O. Access control in a form of active queueing management in multipurpose operation networks / Internat. J. on Advances in Networks

and Services. – 2011. Vol. 4. – № 3 & 4. – P. 363–374.

5. **Zaborovsky V.S., Kondratev A.S., Silinenko A.V., Muliukha V.A., Ilyashenko A.S., Filippov M.S.** Udalennoe upravlenie robototekhnicheskimi objectami v kosmicheskikh eksperimentakh serii «Kontur» / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatica. Upravlenie. Telekommunikatsii. – St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – № 6(162). – S. 23–32. (rus)

6. **Zayats O.I., Zaborovsky V.S., Muliukha V.A., Verbenko A.S.** Upravlenie paketnimi kommutatsiyami v telematicheskikh ustroystvakh s ogranichenim buferom pri ispolzovanii absolutnogo prioriteta i veroyatnostnogo vitalkivaushego machanisma. Ch. 1 / Programnaya Ingeneria. – 2012. – № 2. – S. 22–28. (rus)

7. **Zayats O.I., Zaborovsky V.S., Muliukha V.A., Verbenko A.S.** Upravlenie paketnimi kommutatsiyami v telematicheskikh ustroystvakh s ogranichenim

buferom pri ispolzovanii absolutnogo prioriteta i veroyatnostnogo vitalkivaushego machanisma. Ch. 2 / Programnaya Ingeneria. – 2012. – № 3. – S. 21–29. (rus)

8. **Zaborovsky Vladimir, Lukashin Alexey, Kuprenko Sergey, Muliukha Vladimir.** Dynamic Access Control in Cloud Services / Internat. Transactions on Systems Science and Applications. – Dec. 2011. – Vol. 7. – № 3/4. – P. 264–277.

9. **Zaborovsky Vladimir S., Kuprenko Sergey V., Shemanin Yuri A.** Secure computer network with a network screen / Patent US 7281129.

10. **Zaborovsky V.S., Kondratyev A.S., Muliukha V.A., Silinenko A.V., Ilyashenko A.S.** Upravlenie gruppirovkami naplanethikh robotov s borta pilotiruemoy orbitalnoy stancii v ramkah proekta «METERON» / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatica. Telekommunikatsii. Upravlenie. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. – № 6(162). – S. 59–66. (rus)

ЗАБОРОВСКИЙ Владимир Сергеевич – *заведующий кафедрой телематики (при Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики) Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vlad@neva.ru

ZABOROVSKY, Vladimir S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vlad@neva.ru

ИЛЬЯШЕНКО Александр Сергеевич – *аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com

ILYASHENKO, Aleksandr S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: ilyashenko.alex@gmail.com

МУЛЮХА Владимир Александрович – *старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики.*

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru

MULIUKHA, Vladimir A. *Senior Researcher Center for Robotics and Technical Cybernetics.*
194064, Tichoretskiy pr. 21, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vladimir@mail.neva.ru



УДК 53.081.1

*А.А. Петров, В.В. Давыдов, Д.В. Залетов, В.Е. Шабанов***ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ ДЛЯ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ Cs¹³³***A.A. Petrov, V.V. Davydov, D.V. Zaletov, V.E. Shabanov***DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER FOR THE QUANTUM STANDARD OF FREQUENCY ON ATOMS OF Cs¹³³**

Рассмотрена новая конструкция цифрового синтезатора частоты для квантового стандарта частоты на атомах Cs¹³³. Проведенные исследования работы новой конструкции синтезатора показали увеличение точности воспроизведения частоты. Увеличилось разрешение по частоте и фазе, улучшилось значение девиации Аллана. Новая конструкция синтезатора обладает более низким энергопотреблением.

КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ; СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТЫ; ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ; ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА; НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ.

The article describes a new design of a digital frequency synthesizer of quantum frequency standard on atoms of Cs¹³³. A research of the new synthesizer design showed an increase in the frequency accuracy. Permission on the frequency and a phase increased, improved the value of the Allan deviation. New design of the synthesizer has a lower power consumption.

QUANTUM FREQUENCY STANDARDS; FREQUENCY SYNTHESIZER; DIGITAL SYNTHESIS; SINE-WAVE GENERATOR; FREQUENCY INSTABILITY.

В связи с увеличением тенденции сведения измерения самых разнообразных физических величин к измерению частоты, предъявляются все более жесткие требования к точности, надежности и удобству измерения частоты. Поэтому модернизация действующих и разработка новых устройств измерения частоты являются одними из наиболее актуальных физических и технических задач.

В качестве примеров областей применения точного измерения частоты можно привести службу времени, навигацию, исследования космоса, космические спутники связи. В метрологических и измерительных службах частотные измерения постепенно вытесняют измерения других физических величин. Без надежной работы стандартов частоты невозможно также нормальное функционирование многих сфер деятельности человека, особенно если в них используется вычислительная техника.

В настоящее время квантовые стандарты частоты (КСЧ) являются основными устройствами, обеспечивающими формирование и воспроизведение с высокой точностью физической единицы измерения времени и частоты.

Учитывая большую значимость КСЧ в науке и технике, перед разработчиками квантовых стандартов частоты постоянно ставятся задачи по их модернизации и разработке новых моделей [1, 2]. Все это привело к тому, что после многочисленных модернизаций и усовершенствований одни модели КСЧ полностью вытеснили другие. Так, например, квантовые стандарты частоты на атомах Rb⁸⁷ и Cs¹³³, имеющие малый объем, вес и низкую потребляемую мощность по сравнению со стандартами на атомах H² и Na²³, вытеснили последние из конструкций различных подвижных носителей, летательных аппаратов и бортовой аппаратуры.

Необходимость в модернизации КСЧ возникает также в связи с изменяющимися требованиями к летательным аппаратам. Процесс модернизации включает в себя различные направления: изменение массы и размеров используемых КСЧ, снижение их энергопотребления, улучшение их метрологических характеристик [3]. Причем часто модернизации подвергается не вся конструкция КСЧ, а отдельные узлы или блоки, в зависимости от задач, стоящих в данный момент перед разработчиками.

В статье представлено одно из направлений модернизации КСЧ на атомах Cs^{133} : отдельного блока – синтезатора частоты с целью повышения точностных характеристик стандарта и увеличения его функциональных возможностей.

Цифровой синтезатор частоты

Работа КСЧ на атомах Cs^{133} основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора (КГ) по частоте квантового перехода атомов цезия Cs^{133} атомно-лучевой трубки (АЛТ). Струк-

турная схема КСЧ представлена на рис. 1.

На схеме следующие обозначения:

БГУВ – блок генератора и усилителей выхода; ПЧ – преобразователь частоты; СЧ – синтезатор частоты; АЛТ – атомно-лучевая трубка; УС – усилитель; РУ – реле управления; УУ – устройство управления; ИФ – интерфейс; УК – устройство контроля; ПЦА – преобразователь цифро-аналоговый.

Одним из важных функциональных узлов КСЧ является синтезатор частоты (СЧ). Он принимает участие в формировании резонансной частоты квантового перехода атомов цезия. Выходной сигнал блока генератора и усилителей выхода (БГУВ) частотой 5 МГц подается на преобразователь частоты (ПЧ) и СЧ. В СЧ частота входного сигнала 5 МГц преобразуется в частоту 12,631 МГц путем умножения частоты 5 МГц до 15 МГц и вычитания частоты 2,369 МГц. Частоту 2,369 МГц формирует цифровой синтезатор частоты. С выхода СЧ сигнал частоты 12,631 МГц поступает на генератор гармоник (ГГ) преобразова-

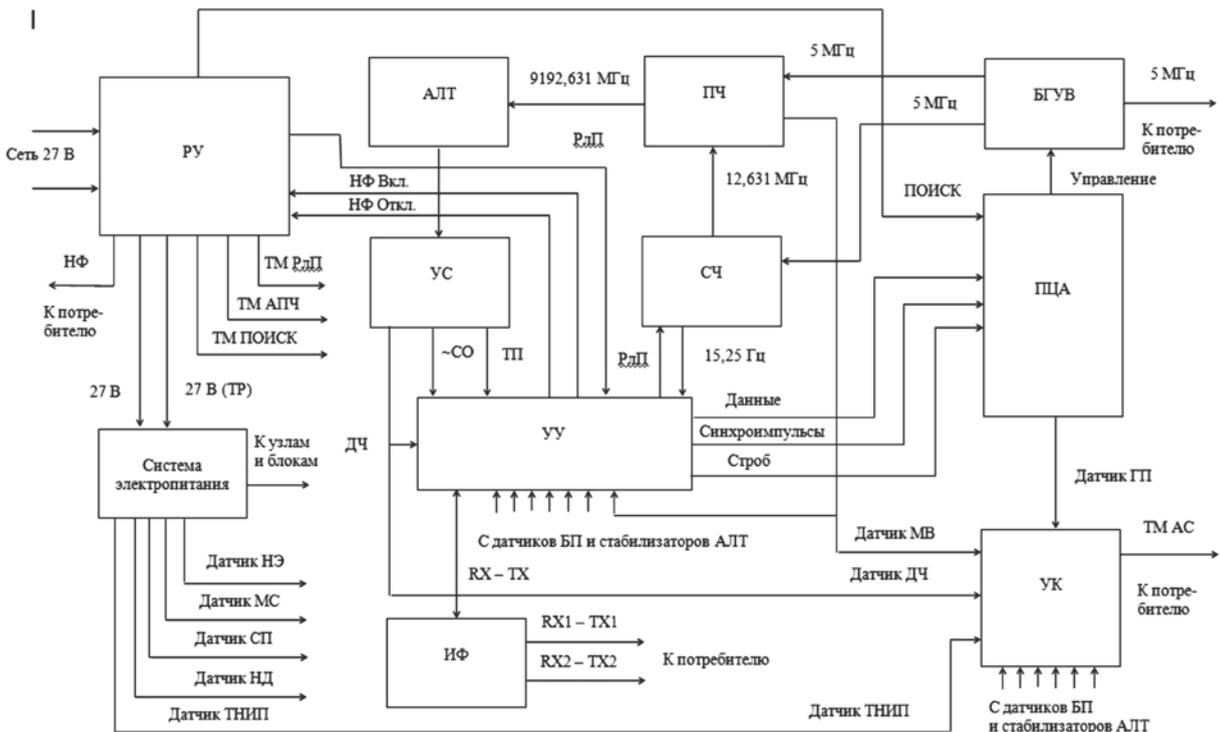


Рис. 1. Структурная схема КСЧ

теля частоты. В преобразователь частоты также поступает частота входного сигнала 5 МГц, которая в нем умножается до частоты 270 МГц, а потом сигнал этой частоты подается на генератор гармоник преобразователя частоты. Генератор гармоник осуществляет умножение сигнала частоты 270 МГц до частоты 9 180 МГц. К этой частоте прибавляется выходная частота синтезатора частоты 12,631 МГц, в результате чего выходной сигнал сверхвысокой частоты (СВЧ) преобразователя частоты представляет частоту 9 192,631 МГц, которая используется в работе КСЧ.

Весьма важным показателем синтезатора частоты является его способность влиять на характеристику нестабильности частоты преобразуемого сигнала, что определяет в некоторой степени достижимую стабильность частоты выходного сигнала КСЧ. Нестабильность частоты, вносимая синтезатором, определяется боковыми дискретными составляющими спектра сигнала, возникающими при делении, умножении, смешении частот сигналов, точностью выходной частоты, а также воздействием на сигнал естественных и технических шумов.

Метод формирования выходного сигнала синтезатора частоты исчерпал возможности по увеличению точности. Необходима большая разрешающая способность, поскольку точность воспроизведения частоты 12,631 МГц напрямую влияет на точность получения резонансной частоты атомного перехода. Кроме того, элементная база, на которой реализуется данный метод, устарела и требует замены. Для того чтобы новая конструкция синтезатора успешно применялась в космических аппаратах, необходимо разработать схему отечественного

производства под существующие космические аппараты с использованием новейшей зарубежной базы.

В статье рассматривается новая конструкция цифрового синтезатора частоты (генератора синусоидального сигнала управляемой частоты). В ней используется метод прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS). Выбор такого решения обусловлен рядом достоинств по сравнению с остальными методами синтеза частоты. Метод прямого цифрового синтеза уникален своей цифровой определенностью: генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известна и подконтрольна. Также к преимуществам данного метода можно отнести высокое разрешение по частоте и фазе, высокую скорость перестройки, цифровой интерфейс, широкий диапазон генерируемых частот.

Разработанная новая схема цифрового синтезатора приведена на рис. 2.

Блок Загрузка данных с помощью периферийного интерфейса передачи данных SPI (Serial Peripheral Interface) осуществляет загрузку кода частоты из микроконтроллера в последовательном режиме (42 разряда), что представлено на рис. 3.

Полученный код частоты поступает в Блок модуляции. Устройство модуляции осуществляет мультиплексирование кода частоты из двух регистров на вход аккумулятора фазы сигналом F_m , являющимся меандром низкой частоты (15, 30 или 78 Гц). Аккумулятор фазы (Накопительный сумматор) реализован в виде 40-разрядного накапливающего сумматора.



Рис. 2. Структурная схема цифрового синтезатора

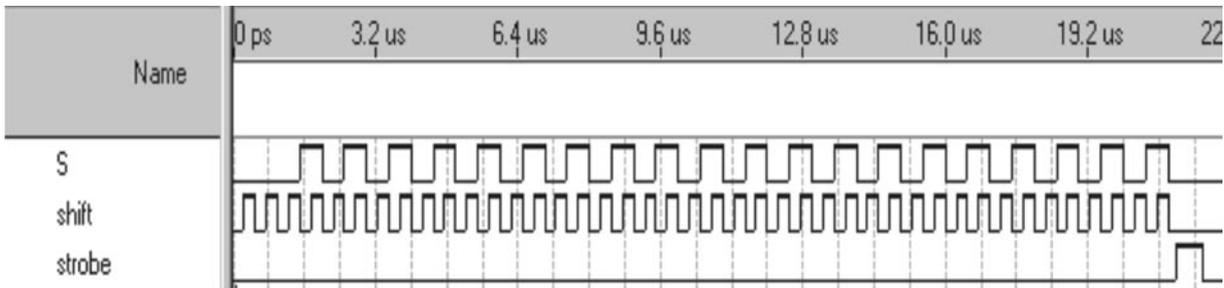


Рис. 3. Временная диаграмма загрузки кода частоты в последовательном режиме

Накопительный сумматор представляет собой 10-ступенчатый конвейер, разбивающий суммирование 40-разрядных слов на суммирование 10 групп по четыре разряда. Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю 2^N . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции $\sin(x)$ с периодом 2π [4]. Другими словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Эта частота определяется формулой:

$$F_{out} = \frac{M * F_{clk}}{2^N}, \quad (1)$$

где F_{out} – выходная частота; F_{clk} – тактовая частота; M – код частоты в двоичном виде; N – разрядность аккумулятора фазы.

В отличие от ранее использовавшихся

схем, где выходная частота формировалась с помощью сигналов переполнения накопительного сумматора, в разработанной схеме принципиально новым является использование логического устройства, в данном случае – дешифратора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Накопительный сумматор формирует аргумент функции синус, который поступает на логическое устройство, реализующее функцию синус с помощью таблицы синусов, заложенной в ПЗУ. На выходе этого блока формируется 10-разрядный цифровой код синуса, который далее поступает на ЦАП. В связи с применением 10-ступенчатого конвейера обеспечивается стабильная работа на заданной тактовой частоте 40 МГц. Большая разрядность аккумулятора фазы, а также возможность модуляции обеспечивают высокую точность выходной частоты. В предыдущей

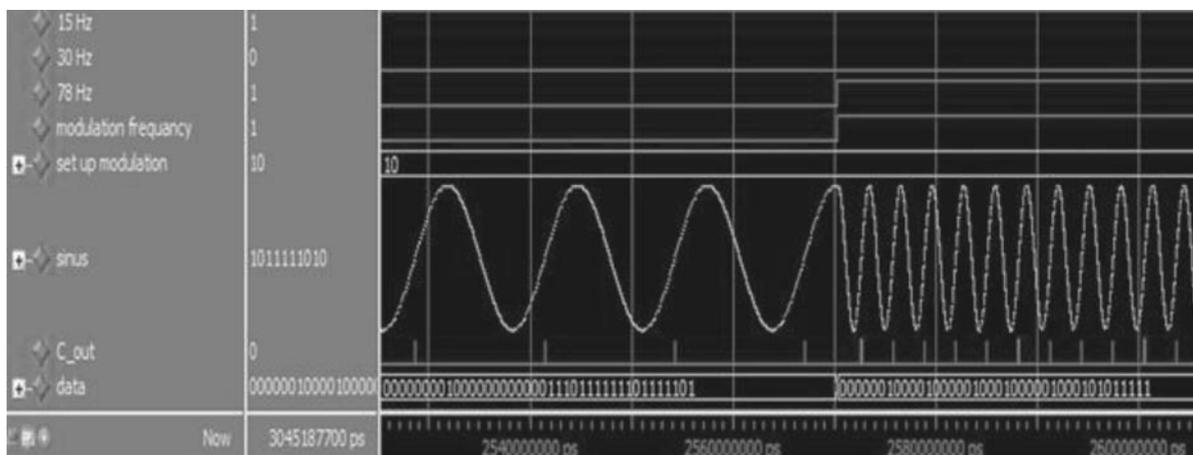


Рис. 4. Результат моделирования работы схемы

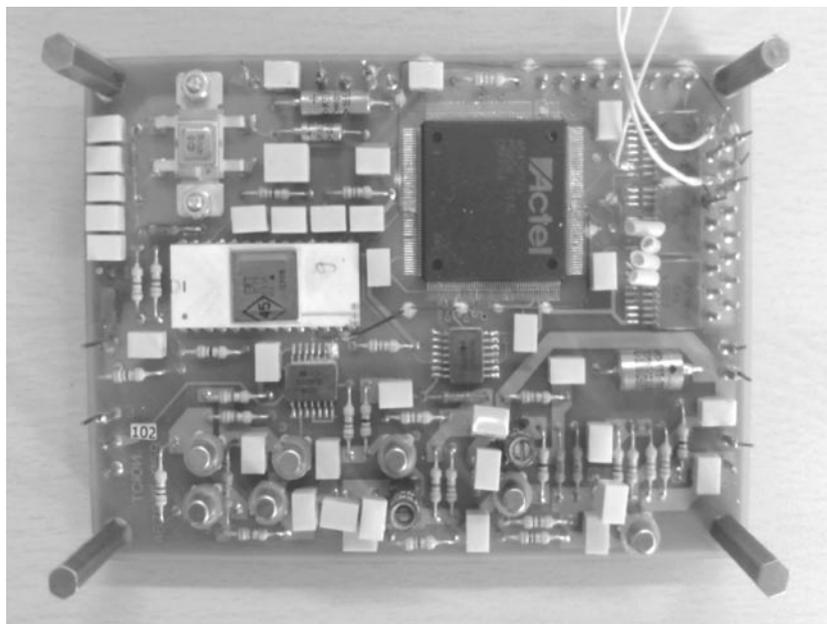


Рис. 5. Плата синтезатора частоты

конструкции синтезатора использовался 32-разрядный сумматор. Увеличение разрядности накопительного сумматора приводит к уменьшению шага перестройки частоты. В разработанной схеме синтезатора частоты при работе на тактовой частоте 40 МГц и разрядности аккумулятора фазы 40 разрядов, шаг перестройки будет составлять

$$\Delta F_{\text{out}} = \frac{F_{\text{clk}}}{2^N} = \frac{40 \text{ МГц}}{2^{40}} = 0,00004 \text{ Гц.} \quad (2)$$

Этот результат превышает значение, которое получалось в ранее используемых схемах синтезаторов для квантовых стандартов частоты, на два порядка.

Моделирование работы схемы разработанного синтезатора осуществлено в про-

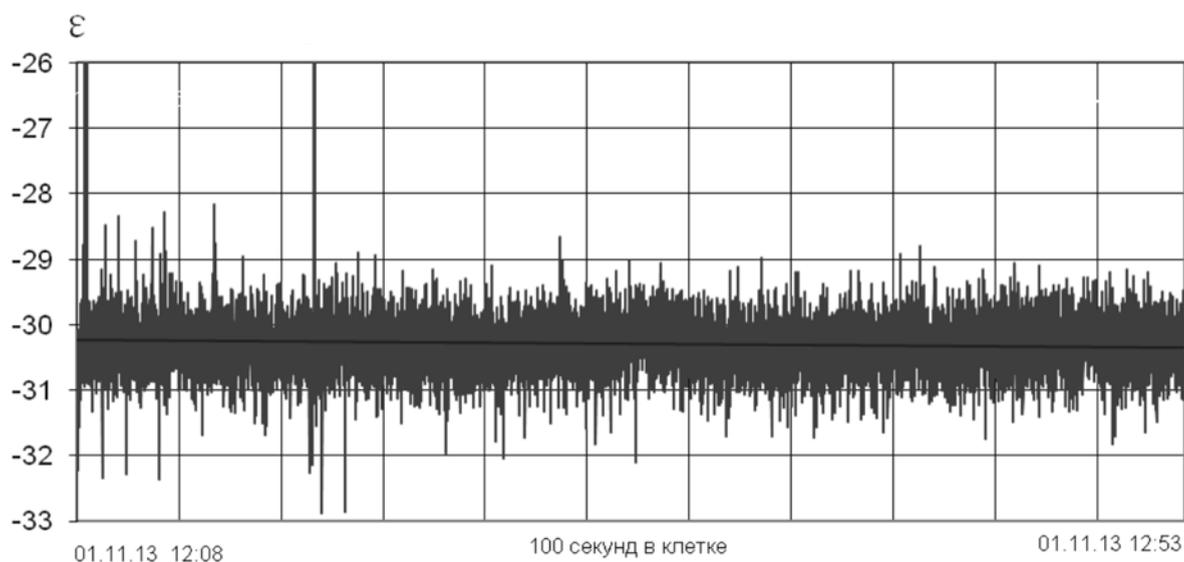


Рис. 6. Результат измерения относительного изменения частоты ε от времени с использованием применяемого ранее синтезатора частоты

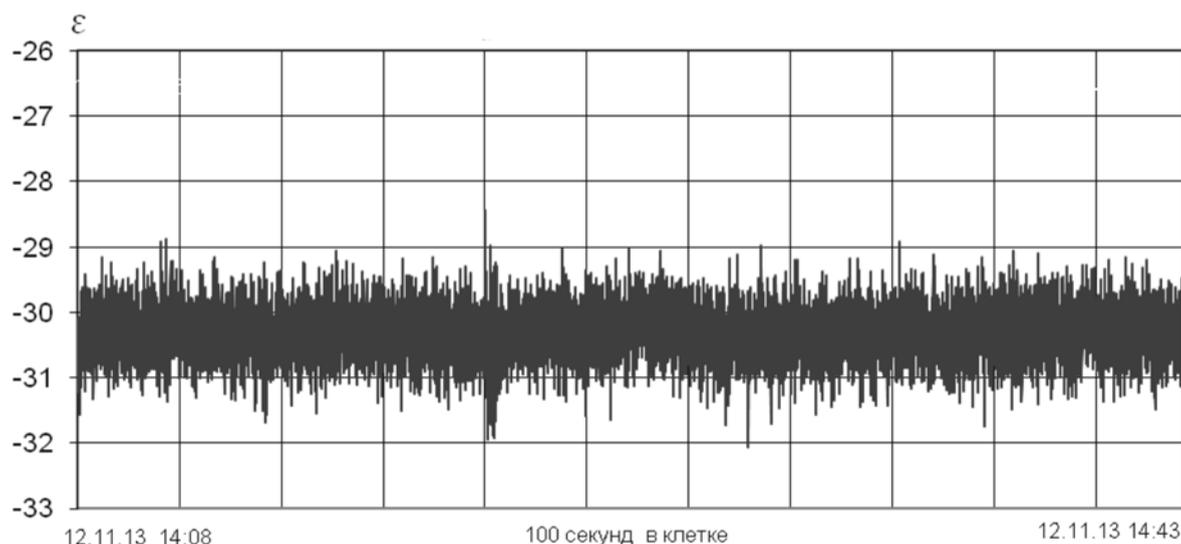


Рис. 7. Результат измерения относительного изменения частоты ε от времени с использованием нового цифрового синтезатора частоты

грамме ModelSim, позволяющей учесть особенности работы схемы на поведенческом (логическом) уровне, а также учитывающей внутренние задержки переключения элементов и дополнительные задержки при трассировке соединений элементов. На рис. 4 представлен полученный результат: синусоидальный сигнал, меняющий свою частоту при изменении управляющего сигнала модуляции.

После моделирования работы схемы синтезатора частоты была изготовлена рабочая плата, представленная на рис. 5.

Проверка на работоспособность также показала удовлетворительные результаты, совпадающие с теоретическими расчетами.

Затем плата синтезатора частоты была включена в состав КСЧ, как отдельный блок. Был произведен эксперимент, заключающийся в измерении частоты стандар-

та и последующем вычислении дисперсии Аллана, позволяющей оценить нестабильность частоты.

На рис. 6 и 7 приведены результаты измерения относительного изменения частоты ε от времени с использованием применяемого до настоящего времени и разработанного нами цифрового синтезатора частоты, где $\varepsilon = \frac{f_i - f_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}}}$. Цена деления ε составляет 10^{-12} .

Расчет дисперсии Аллана произведен по следующей формуле:

$$\sigma_y = \frac{\sum_i^n \sigma_{0i}^2}{n-1}, \quad (3)$$

где $\sigma_{0i} = \frac{f_{i+1} - f_i}{f_{\text{НОМ}}}$ – относительная i -я вариация частоты; n – число вариаций.

Значения дисперсии Аллана для различных КСЧ

	100 с	1000 с	Час	Сутки
С ранее используемым синтезатором	5,91E-13	1,34E-13	6,76E-14	6,06E-14
С разработанным синтезатором	3,88E-13	1,14E-13	6,69E-14	5,94E-14

Результаты величин дисперсии Аллана, полученные при работе КСЧ со старым и новым синтезаторами частоты, приведены в сравнительной таблице.

Из полученных результатов видно, что использование нового синтезатора дает возможность получить улучшение кратковременной стабильности частоты на $2 \cdot 10^{-13}$.

По результатам исследований работы новой конструкции синтезатора частоты установлено, что появилась возможность с большей точностью получать различные частоты синусоидального сигнала с выхода синтезатора частоты. Увеличилась точность

воспроизведения частоты: улучшено значение девиации Аллана (σ_y). По сравнению с предыдущими значениями кратковременная нестабильность улучшилась на $2 \cdot 10^{-13}$ и теперь составляет $\sigma_y = 3,9 \cdot 10^{-13}$. Разрешение по частоте и фазе увеличено более чем на два порядка. Реализована возможность цифрового управления частотой и фазой. Улучшены спектральные характеристики, подавление боковых амплитудных составляющих составило около -60 дБ. Собранная новая конструкция синтезатора частоты обладает более низким энергопотреблением, что очень важно для эксплуатации спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 496 с.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. — М.: Физматлит, 2009. — 511 с.
3. Гужва Ю.Г., Геворкян А.Г., Басевич А.Б. и др. Глобальная навигационная спутниковая

система ГЛОНАСС и роль РИРВ в ее создании и совершенствовании // Радионавигация и время. — 1997. — № 1. — С. 64–69.

4. Ридико Л.И. Прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. — 2001. — № 7. — С. 34–38.

REFERENCES

1. Dudkin V.I., Pakhomov L.N. Kvantovaya elektronika. — St.-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. — 496 s. (rus)
2. Rile F. Standarty chastoty. Printsipy i primeneniia. — Moscow: Fizmatlit, 2009. — 511 s. (rus)
3. Guzhva Yu.G., Gevorkian A.G., Basevich A.B. i dr. Global'naia navigatsionnaia sputnikovaia

sistema GLONASS i rol' RIRV v ee sozdanii i sovershenstvovanii / Radionavigatsiia i vremia. — 1997. — № 1. — S. 64–69. (rus)

4. Ridiko L.I. Priamoi tsifrovoi sintez chastoty / Komponenty i tekhnologii. — 2001. — № 7. — S. 34–38. (rus)

ПЕТРОВ Александр Анатольевич — студент 6 курса Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: Alexandrpetrov.spb@yandex.ru

PETROV, Aleksandr A. St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: Alexandrpetrov.spb@yandex.ru

ДАВЫДОВ Вадим Владимирович — доцент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

DAVYDOV, Vadim V. St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

ШАБАНОВ Владимир Евгеньевич – *начальник лаборатории квантовых стандартов частоты Российского института радионавигации и времени.*

191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, д. 2.

SHABANOV, Vladimir E. *The Russian Institute of Radionavigation and Time.*

191124, pl. Rastrelli 2, St.-Petersburg, Russia.

ЗАЛЕТОВ Дмитрий Валерьевич – *ведущий инженер Российского института радионавигации и времени.*

191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, д. 2.

ZALETOV, Dmitry V. *The Russian Institute of Radionavigation and Time.*

191124, pl. Rastrelli 2, St.-Petersburg, Russia.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ТЕТРОДА

I.V. Sivchek, V.A. Sorotsky

SIMULATION MODEL OF POWER TETRODE

Рассмотрен новый подход к построению модели мощного генераторного тетрода, предназначенной для применения в SPICE-подобных симуляторах. Используемая в модели аппроксимация характеристик тетрода позволила учесть физические эффекты, связанные со взаимным влиянием напряжений на аноде, экранированной и управляющей сетках на токи, протекающие через эти выводы, что привело к более чем двукратному снижению погрешности вычисления основных характеристик тетрода по сравнению с известными аналогами.

МОЩНЫЙ ГЕНЕРАТОРНЫЙ ТЕТРОД; АППРОКСИМАЦИЯ; SPICE; РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО.

The paper covers a new approach to the development of a power tetrode simulation model applicable in SPICE-similar simulators. Used approximation of tetrode characteristics reveals physical effects of the plate, screen grid and control grid voltages influence on the electrodes' currents. It resulted in error decline compared with the known models as much as more than two times.

POWER TETRODE; APPROXIMATION; SPICE; TRANSMITTER.

Несмотря на успехи, достигнутые за последние десятилетия в совершенствовании характеристик полупроводниковых приборов, электронно-вакуумные лампы (ЭВЛ) по-прежнему находят широкое применение как в нашей стране, так и за рубежом при создании мощных (до 1000 кВт) и сверхмощных (свыше 1000 кВт) радиопередающих устройств (РПДУ). Опубликованные недавно в [1] результаты теоретических и экспериментальных исследований, в которых показана возможность заметного улучшения энергетических характеристик РПДУ, выполненных на ЭВЛ, могут еще больше повысить интерес специалистов к использованию данных приборов. Действительно, за счет реализации в конечном каскаде на мощном генераторном тетроде ключевого режима класса E с уменьшенными коммутационными потерями мощности, который

до этого применялся только в транзисторных схемах, промышленный КПД РПДУ может возрасти до значений 75–78 %, а электронный КПД при этом составит 88–92 %. По этим показателям РПДУ на ЭВЛ, уже начиная с частот в десятки килогерц, вполне могут конкурировать с аналогичными характеристиками радиопередатчиков, реализуемых на полупроводниковой элементной базе, заметно опережая их по уровню выходной мощности.

При проектировании РПДУ на мощных генераторных лампах разработчики обычно сталкиваются с рядом проблем, обусловленных высокой трудоемкостью традиционно применяемых в подобной практике аналитических методов расчета и их сравнительно большой погрешностью, превышающей иногда значения 15–20 %. Указанную проблему можно преодолеть с

помощью имитационного компьютерного моделирования, которое, учитывая достаточно высокий уровень выходной мощности, позволит сократить затраты времени и средств на стадии экспериментального макетирования устройства. Однако этому мешает отсутствие качественных компьютерных моделей генераторных ЭВЛ. С учетом изложенного, цель настоящей работы – создание модели мощного генераторного тетрода, обеспечивающей повышение точности расчетов оконечных каскадов радиопередающих устройств и предназначенной для использования в универсальных средах схемотехнического моделирования.

Сравнительный анализ существующих подходов к построению компьютерных моделей ЭВЛ. Существует несколько моделей ЭВЛ различных типов (триод, тетрод, пентод), созданных применительно к задачам разработки аудиоаппаратуры и по этой причине в основном подходящих для описания маломощных ламп. Попытка их использования для описания электрических характеристик мощных генераторных тетродов выявила существенные недостатки.

В модели Дункана Монро [2], входящей в состав стандартных библиотек *Micro-Cap*, аппроксимация тока управляющей сетки не учитывает зависимость от напряжения на экранной сетке. Кроме того, аппроксимация тока анода не учитывает уменьшение крутизны проходной характеристики при большом уровне сигнала на управляющей сетке.

В модели Нормана Корена [3], используемой в *PSpice*-библиотеке ЭВЛ, функция, лежащая в основе аппроксимации характеристик анодного тока, не учитывает влияние напряжения на аноде при малых токах, а в функции, описывающей ток экранной сетки, не отражена зависимость от напряжения на аноде. Ток управляющей сетки аппроксимируется с помощью диодной характеристики, что не позволяет учесть зависимость от напряжения на аноде и на экранной сетке.

В модели Чарльза Райдела [4], применяемой в библиотеках компонентов среды схемотехнического моделирования *ICAP/4* (*SPICE*-подобный симулятор), функция,

аппроксимирующая ток управляющей сетки, не позволяет отразить зависимость от напряжения на экранной сетке и напряжения на аноде. В основе аппроксимации тока анода лежит известный закон «3/2», который не учитывает уменьшение крутизны проходной характеристики в области больших напряжений на управляющей сетке.

Технологии построения модели мощного генераторного тетрода. Существующие подходы, применяемые при создании моделей электронных приборов, можно разбить на две категории.

1. Нахождение функций, описывающих электрические характеристики прибора, исходя из физических законов, лежащих в основе его работы. Данный способ применяется в первую очередь компаниями-разработчиками приборов, т. к. требует знания конструктивно-технологических параметров, как правило, недоступных для потребителей.

2. Определение приближающих функций, описывающих электрические характеристики прибора, на основе экспериментальных данных с использованием формализованных параметров, которые не всегда могут быть интерпретированы физически. Несмотря на отмеченный недостаток, данный метод получил широкое распространение на практике. В частности, поскольку он хорошо подходит для реализации в *SPICE*-симуляторах и им подобных продуктах, все три описанные выше модели тетродов созданы именно таким образом. В числе других общих особенностей реализации второго метода следует также отметить возможность представления искомой аппроксимирующей функции с помощью известного набора элементарных функций, хотя в ряде случаев это может быть сопряжено с более высокой трудоемкостью решения данной задачи.

Модель мощного генераторного тетрода. Исходя из рассмотренных выше достоинств второго метода, при решении задачи воспроизведения характеристик генераторных ЭВЛ представлялось целесообразным взять за основу именно его, обратив особое внимание на то, чтобы в разрабатываемой мо-

дели нашли свое адекватное отражение те важные для мощных приборов физические эффекты, которые не учтены в известных моделях.

Основную сложность при создании модели представляет описание статических характеристик тетрода. Поведение динамических характеристик определяется межэлектродными емкостями, учет которых не представляет трудностей. Таким образом, задачу можно свести к нахождению трех аппроксимирующих функций (токи электродов) от трех переменных (напряжения на электродах).

Ток анода. В отличие от рассмотренных выше моделей [2–4] зависимость тока анода от напряжения на управляющей сетке целесообразно выразить с помощью функции на основе гиперболического тангенса. Данный прием известен давно и, как показано в ряде научно-технических публикаций, позволяет уменьшить погрешность воспроизведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ЭВЛ в области больших токов анода. Зависимость тока от напряжений на других электродах можно учесть с помощью введения линейных коэффициентов по аналогии с законом «3/2» для тетродов, в котором такие коэффициенты характеризуют межэлектродную проницаемость. Аппроксимирующая функция имеет вид:

$$I_p = (A + B \cdot th(C(U_g + D(U_p, U_s))))F(U_p, U_s), \quad (1)$$

$$D(U_p, U_s) = p_{00} + p_{10} \cdot U_p + p_{01} \cdot U_s, \quad (2)$$

$$F(U_p, U_s) = q_{00} + q_{10} \cdot U_p + q_{01} \cdot U_s, \quad (3)$$

где I_p – ток анода; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; $A, B, C, p_{01}, p_{00}, p_{10}, q_{00}, q_{10}, q_{01}$ – коэффициенты. Функция $F(U_p, U_s)$ служит для увеличения точности аппроксимации.

Ток экранной сетки. Для описания поведения зависимости тока экранной сетки от напряжений на электродах (управляющей сетке, аноде и экранной сетке) целесообразно воспользоваться следующей функцией:

$$I_s = G(U_g + r_{00} + r_{10} \cdot \sqrt{U_p} + r_{01} \cdot U_s)^3, \quad (4)$$

где I_s – ток экранной сетки; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; $G, r_{01}, r_{00}, r_{10}$ – коэффициенты.

Следует заметить, что на характер зависимости влияет технология, по которой создана лампа, поэтому может потребоваться корректировка данного выражения с учетом технологических особенностей конкретных типов ЭВЛ.

Ток управляющей сетки. Для повышения точности аппроксимации данного тока в сравнении с указанными выше моделями необходимо учесть его зависимость от напряжений на аноде и экранной сетке. С учетом этого целесообразно использовать функцию:

$$I_g = (s_{00} + s_{10} \cdot U_p + s_{01} \cdot U_s)U_g^{1.5}, \quad (5)$$

где I_g – ток управляющей сетки; U_p – напряжение на аноде; U_s – напряжение на экранной сетке; U_g – напряжение на управляющей сетке; s_{01}, s_{00}, s_{10} – коэффициенты.

Нахождение коэффициентов аппроксимирующих функций. Неизвестные коэффициенты в (1)–(5) могут быть определены путем решения оптимизационной задачи с использованием одного из алгоритмов поиска глобального экстремума, реализованного для применения в программных продуктах типа MATLAB, Mathcad и т. п. В качестве целевой функции целесообразно использовать, например, среднеквадратическое отклонение в экспериментальных точках.

Критерии оценки качества имитационной модели. Наибольший интерес при исследовании оконечных каскадов РПДУ, выполненных на мощных ЭВЛ, обычно представляют энергетические характеристики, которые должны быть определены с заданной точностью. Требования к допустимой погрешности вычисления этих характеристик обычно нетрудно преобразовать в аналогичный показатель, отражающий погрешность аппроксимации статических ВАХ приборов. При этом очевидно, что различные участки ВАХ могут иметь неодинаковую точность аппроксимации, причем

отличие может оказаться довольно существенным. В данном случае следует учесть, насколько важным является вклад того или иного участка в характеристики исследуемого режима работы РПДУ. Если не удается аппроксимировать ВАХ на всех участках с точностью не хуже заданной, то следует попробовать обеспечить необходимую точность на участках, наиболее важных для моделирования исследуемого режима работы усилителя мощности. Это подчеркивает необходимость осознанного выбора целевой функции, используемой при нахождении коэффициентов аппроксимирующих зависимостей. Так, например, минимизация среднеквадратического отклонения приведет к тому, что наибольшая относительная точность аппроксимации будет получена для больших значений токов, что может не отвечать требованиям конкретной задачи.

В качестве примера рассмотрим аппроксимацию тока анода лампы ГУ-94. Если интерполировать экспериментальные данные, то для каждой ветви характеристик $I_p(U_g)$ можно построить график зависимости относительной ошибки аппроксимации от величины тока при различных напряжениях на аноде и экранной сетке. Относительная ошибка аппроксимации ветви ВАХ вычисляется по формуле:

$$(I_{p_app}(U_g) - I_{p_s}(U_g)) \cdot 100 / I_{p_s}(U_g)$$

при $U_p, U_s = \text{const}$,

где $I_{p_app}(U_g)$ – аппроксимирующая функция; $I_{p_s}(U_g)$ – сплайн-интерполяция экспериментальных данных.

На рисунке показаны графики, полученные усреднением этих зависимостей при двух различных критериях нахождения коэффициентов. Как легко заметить, модель мощного генераторного тетрода, разработанная на основе рассмотренного в настоящей статье метода аппроксимации (кривые 1 и 2), дает в среднем существенно меньшую ошибку, чем, например, модель Корена (кривая 3). Для кривой 1 максимальная нормированная среднеквадратическая ошибка аппроксимации тока анода на одной ветви ВАХ не превышает 2 %. При этом погрешность аппроксимации тока

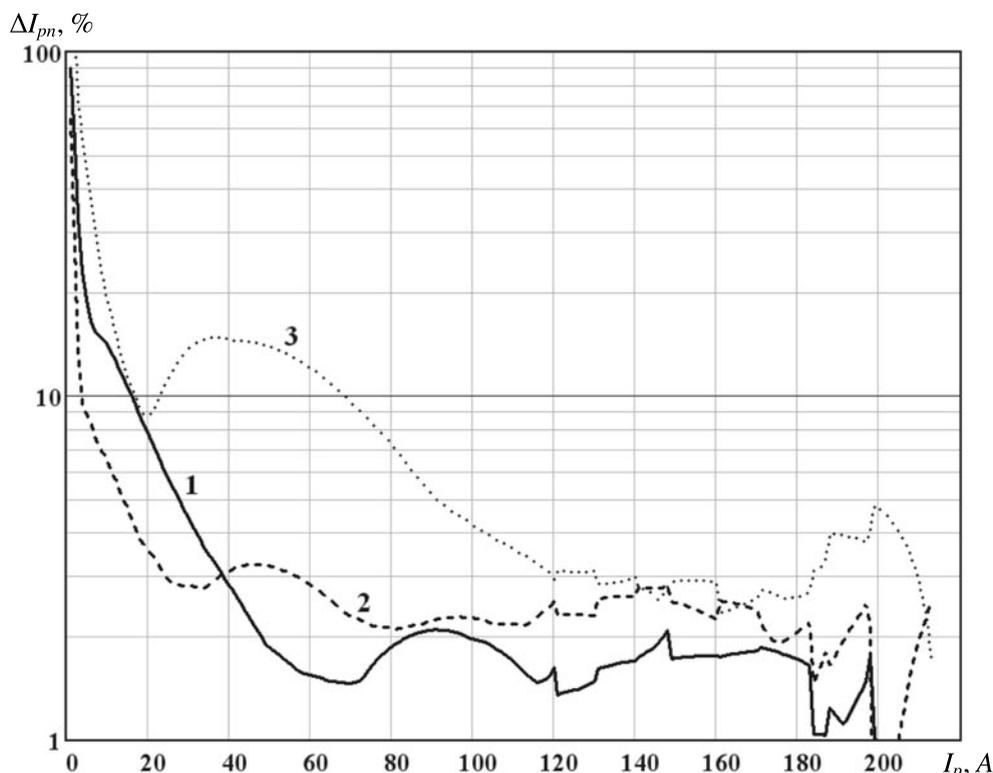
управляющей сетки не превышает 3 %, а тока экранной сетки – 5 %.

Как и следовало ожидать, использование метода наименьших квадратов в качестве критерия нахождения коэффициентов аппроксимирующей функции привело к тому, что наилучшая относительная точность получается для больших токов, а для малых ошибка составляет десятки процентов.

Кривая 2 относится к случаю, когда коэффициенты аппроксимирующей функции найдены исходя из критерия минимизации суммы модулей ошибок с использованием весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты равны десяти для токов, не превышающих 40 А, и единице для всех остальных. Видно, что распределение ошибки в зависимости от величины тока стало более равномерным. Например, при токе 20 А относительная ошибка уменьшилась примерно в два раза. Однако при этом возросла ошибка аппроксимации больших токов.

Рассмотренный пример показывает, что выбор критерия нахождения параметров аппроксимирующих функций может оказать большое влияние на ошибку аппроксимации и, как следствие этого, – на ошибки моделирования усилителя мощности РПДУ. Это актуально и при аппроксимации остальных токов ЭВЛ.

Рассмотренный в настоящей статье подход позволил реализовать имитационную модель мощного генераторного тетрода, превосходящую известные аналоги как по качественным, так и по количественным показателям. В плане качественных достоинств предложенной модели следует подчеркнуть то, что она более полно учитывает физические эффекты, связанные со взаимным влиянием напряжений на аноде, экранной и управляющей сетках, на токи, протекающие через эти выводы. В свою очередь, улучшение количественных характеристик модели, оцениваемое по снижению погрешности, достигается за счет более точного подбора приближающих функций, описывающих электрические характеристики прибора. Это позволило, в частности, уменьшить среднеквадратиче-



Относительная ошибка аппроксимации тока анода ΔI_{pn} в зависимости от величины тока I_p . Критерий нахождения параметров аппроксимирующей функции: 1 – минимизация суммы квадратов ошибок; 2 – минимизация суммы модулей ошибок с весовыми коэффициентами; 3 – минимизация суммы квадратов ошибок для модели Корена

скую ошибку аппроксимации тока анода в 2,5 раза по сравнению с моделью Корена, которую можно считать наиболее точной из известных аналогов.

Благодаря тому, что модель изначально создавалась с расчетом на использование в SPICE-подобных симуляторах, она хорошо

подходит для реализации в универсальных программных средах схемотехнического моделирования. Это позволит существенно снизить трудоемкость исследования процессов в оконечных каскадах мощных радиопередающих устройств при одновременном повышении точности расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырников Э.В. Построение ключевых радиопередающих устройств большой мощности. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
2. Duncans's Amp Pages [электронный ресурс] / URL: <http://www.duncanamps.com/> (дата обращения 16.08.2013).

3. Koren Norman L. Improved Vacuum-Tube Models for SPICE simulations // Glass Audio. –1996. – Vol. 8. – № 5. –18 p.
4. Rydel Ch. Simulation of Electron Tubes with Spice // Proc. of the 98th Audio Engineering Society Convention, Febr. 25-28, 1995, Paris.

REFERENCES

1. Syrnikov E.V. Postroyeniye klyuchevykh radioperedayushchikh ustroystv bol'shoy moshchnosti. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. (rus)
2. Duncans's Amp Pages. Available <http://www.duncanamps.com/> (Accessed 16.08.2013).

3. Koren Norman L. Improved Vacuum-Tube Models for SPICE simulations / Glass Audio. – 1996. – Vol. 8. –№ 5. –18 p.
4. Rydel Ch. Simulation of Electron Tubes with Spice / Proc. of the 98th Audio Engineering Society Convention, Febr. 25-28, 1995, Paris.

СИВЧЕК Игорь Владимирович – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: cotgreat@gmail.com

SIVCHEK, Igor V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

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

E-mail: cotgreat@gmail.com

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович – заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

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

E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

SOROTSKY, Vladimir A. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

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

E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru



Вычислительные машины и программное обеспечение

УДК 004.651.4

А.М. Бородин, С.Г. Мирвода, С.В. Поршнеv

АНАЛИЗ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ: ПРОБЛЕМЫ ДОСТУПА К ДАННЫМ И ВОЗМОЖНЫЙ ПОДХОД К ИХ РЕШЕНИЮ

A.M. Borodin, S.G. Mirvoda, S.V. Porshnev

HIGH DIMENSIONAL DATA ANALISYS: DATA ACCESS PROBLEMS AND POSSIBLE SOLUTIONS

Обсуждена проблема доступа к многомерным данным размерности порядка 10^4 . Описана система, в ходе создания которой была обнаружена проблема; описаны технические решения, применявшиеся при решении схожих проблем. Также изучены причины, по которым они не подходят для решения описанной проблемы. Указаны особенности существующих технических решений, позволяющие предположить перспективность использования фрагментов этих технологий в обсуждаемой задаче.

МНОГОМЕРНЫЕ ДАННЫЕ; OLAP-СИСТЕМЫ; ИНДЕКСИРОВАНИЕ; ДОСТУП К ДАННЫМ; ИЕРАРХИИ ТИПОВ ПАМЯТИ.

This paper discuss multidimensional access methods applied to 10^4 -dimensional data. Authors describe informational system, development of which encountered this problem. Than this problem is stated, decomposed and detailed. Existing techniques are referenced, theirs advantages and pitfalls are stated in context of the problem.

MULTIDIMENSIONAL DATA; OLAP SYSTEMS; INDEXING; DATA ACCESS; MEMORY HIERARCHY.

Многомерные структуры данных [1, 2] используются в системах обработки информации (СОИ), применяемых в различных областях человеческой деятельности, например, в бизнес-анализе [3], астрономии [4], геоинформатике [5], биоинформатике [6] и др. Анализ опыта их эксплуатации показывает, что одним из главных факторов, определяющих скорость работы СОИ, является скорость доступа к многомерным данным. В этой связи актуальна задача разработки быстрых алгоритмов доступа к многомерным данным. Следует отметить, что с момента начала разработки (80-е гг. XX века) для рассматриваемой

задачи в ее наиболее общей постановке алгоритмов прошло более 30 лет [2], в настоящее время достигнуты определенные успехи в данной области, однако универсальных автоматизированных алгоритмов, легко адаптирующихся для любой конкретной многомерной структуры данных, пока не создано. Как следствие, при разработке СОИ оказывается, что не удается использовать известные технологии доступа к многомерным данным без существенной модернизации либо создания новых алгоритмов, адаптированных к особенностям собираемой и обрабатываемой информации на конкретном производстве.

С подобной ситуацией мы столкнулись при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения по теме «Разработка автоматизированной системы слежения, контроля, моделирования, анализа и оптимизации полного цикла выпуска металлургической продукции на основе создания и интеграции математических моделей технологических, логистических и бизнес-процессов предприятия (АС ВМП)» (Шифр 2012-218-03-167). АС ВМП, состоящая из двух взаимодействующих модулей: автоматизированной информационной системы сбора и анализа данных производства (АИС САД) и автоматизированной информационной системы моделирования технологических, логистических и организационных (бизнес) процессов предприятия (АИС МОД).

Анализ исходной информации показал, что особенностью структуры данных, собираемых и обрабатываемых разрабатываемой АИС САД, является большое число разнородных измерений (список измеряемых технологических параметров, в т. ч. и в режиме реального времени, включает в себя более семи тысяч наименований), по каждому из которых потенциально может быть произведена выборка. При этом данные, характеризующие технологические процессы металлургического производства, являются высоко интегрированными и не могут быть разделены между различными программными модулями.

Один из возможных подходов к решению рассматриваемой проблемы, подтвержденный экспериментами, проведенными на этапе эскизного проектирования АС ВМП с тестовыми данными, основан на использовании самого быстродействующего на сегодняшний день серверного оборудования и программного обеспечения. Однако его практическая реализация приведет, как очевидно, к резкому удорожанию стоимости проекта. Кроме того, возможно, что в процессе продолжительной эксплуатации системы и накопления больших объемов данных в хранилище данных (ХД) выбранных вычислительных мощностей окажется недостаточно для обеспечения требуемой

скорости выполнения запросов к ХД. Описанная ситуация подтверждает актуальность задачи разработки быстрых алгоритмов доступа к разнородным многомерным данным высокой размерности (данные с общим числом измерений 10^4 и более).

В статье описывается общая постановка проблемы доступа к многомерным данным высокой размерности, изложены результаты анализа возможности использования известных методов доступа к многомерным данным, в т. ч. битовых карт, пространственного хеширования, метода соединения многомерных индексов, а также предложен подход, обеспечивающий быстрый доступ к многомерным данным большой размерности.

Проблемы доступа к многомерным данным высокой размерности

Каждая аналитическая система предназначена для выполнения тех или иных расчетов на соответствующих данных. В процессе выполнения расчетов потребляются вычислительные ресурсы, которые используются для выполнения двух условно независимых друг от друга задач: доступа к данным, хранящимся в ХД, и оперирования извлеченными данными.

Проиллюстрируем данный факт следующими простыми примерами.

Пример 1. В Microsoft Excel имеется таблица, содержащая колонки, названные А, В и С, соответственно. Колонка С содержит значения выражения, вычисляемого в соответствии с формулой $C = A + B$. Очевидно, что данную операцию можно представить в виде абстрактного синтаксического дерева, состоящего из одного узла, соответствующего операции сложения (оперирование данными), а процесс получения значений из конкретных ячеек А и В рассматривать как доступ к данным.

Пример 2. Построение на экране монитора трехмерной сцены. Здесь оперирование данными (в основном вычисление матричных произведений) является наиболее затратным с точки зрения использования вычислительных ресурсов. В то же время процесс извлечения данных требует значительно меньшего количества вычислитель-

ных ресурсов, чем оперирование данными, поскольку объем исходных данных, используемых в вычислениях, относительно невелик.

Пример 3. Поиск пути в графе знакомств большой социальной сети, связывающих двух и/или более пользователей. Здесь расчеты выполняются с минимальным количеством арифметических и условных операций, однако из-за большого объема исходных данных и, как правило, использования распределенного способа хранения этих данных, требуются значительные вычислительные ресурсы для доступа к этим данным.

Исторически сложилось так, что решение задач специализированного доступа к многомерным данным неразрывно связано с иерархией типов памяти. Отметим, что термин «иерархия» используется в т. ч. и по историческим причинам. Здесь, по сути, речь идет о способе упорядочивания типов памяти компьютера: от быстрой, ограниченной в размере и дорогой памяти (регистры процессора, кэш, ОЗУ), к медленной и дешевой памяти (дисковые системы, системы резервирования, облачные хранилища). Основная идея большинства методов доступа к многомерным данным основана на уменьшении количества обращений к медленной памяти за счет эффективного размещения данных в быстрой памяти.

Особенность доступа к многомерным данным состоит в том, что в большинстве случаев производится поиск данных (запросы), затрагивающий одновременно несколько различных свойств данных (различных измерений). Отметим, что здесь список свойств данных, которые могут участвовать в поисковом запросе, известен заранее. Однако их число, как правило, оказывается столь большим, что построение всех одномерных поисковых структур по всем комбинациям измерений оказывается практически невозможным. Например, запрос (который должен быть эффективным с точки зрения затрачиваемых ресурсов) к многомерной структуре данных, содержащей антропометрическую информацию по большому количеству человек, в котором требуется найти людей, имеющих в за-

данных интервалах длину носа, рост, дату рождения. Здесь интервалы, задающие требуемые значения длины носа, роста и даты рождения, — это критерии поиска, а собственно информационные поля, содержащие значения длины носа людей, занесенных в базу данных (БД), их рост и дата рождения — активные измерения поискового запроса. При этом в БД может быть множество различных измерений, но многомерная структура данных должна быть такой, чтобы выполняемые к ней запросы были одинаково эффективны при использовании в них любой возможной комбинации активных измерений из множества всех измерений.

Приведем примеры информационных систем, в которых реализуется обработка многомерной информации.

Пример 4. Геоинформационные системы. Данный класс СОИ, несмотря на то, что они традиционно оперируют с 3–4 измерениями (три пространственные координаты и время), также относят к классу информационных систем, в которых реализуется обработка многомерной информации. Это обусловлено высокой вариативностью используемых в них запросов, например, «поиск дома в заданном прямоугольнике», «поиск ближайшей АЗС к точке нахождения автомобиля» или «поиск оптимального маршрута с тремя и более пересадками» и т. д.

Пример 5. Системы бизнес-анализа. СОИ, относящиеся к данному классу систем, оперируют данными с несколькими десятками измерений поиска [7]. Например, запрос системы бизнес-анализа может выглядеть следующим образом: рассчитать сумму дохода от всех операций по определенной группе тарифов, в определенный интервал дат, в определенном районе города, для абонентов с подключенным цифровым телевидением и широкополосным доступом в Интернет.

На сегодняшний день создано множество различных структур данных, часть из которых описана в [8]. Большинство современных структур данных являются подмножеством т. н. *обобщенного сбалансированного поискового дерева* (GiST [9]), создаваемого

в результате деления всего пространства данных на иерархически вложенные группы, которые являются узлами этого дерева. При этом группировка объектов в пространстве индексируемых данных осуществляется так, чтобы минимизировать число групп, затрагиваемых наиболее вероятными запросами к данным.

Выбор той или иной структуры доступа к данным зависит от структуры данных и структуры запроса. Для количественного обоснования выбора структуры сбалансированного дерева используют т. н. *модели эффективности поискового запроса*. Например, в [10] для оценки эффективности пространственных индексов, используемых для выполнения запросов к многомерным данным бизнес-анализа, предложено использовать следующую модель:

$$DA = 1 + \sum_{x=1}^{\lceil \log_f N \rceil} \frac{N}{F^x} \prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|),$$

здесь DA (disk access) – количество рассмотренных узлов древовидного индекса данных; N – количество индексируемых записей; F (fanout) – фактор ветвления древовидного индекса; $p(s, q)$ – вероятность пересечения диапазонов s и q ; $W(x, s)$ – средний диапазон данных по одному измерению, сгруппированный x раз; D – размерность индексируемых данных; s – средний диапазон, занимаемый одним элементом исходных данных,

$$p(|q|, |s|) = \frac{|s| + |q|}{(1 - |q|)(1 - |s|)},$$

$$W(0, |s|) = |s|,$$

$$W(x + 1, |s|) = \frac{\sqrt[x]{F} - 1}{\sqrt[x]{N(x)}} + W(x, |s|).$$

Кроме того, в [10] показано, что в общем случае при оперировании данными бизнес-анализа с количеством измерений порядка 10^1 , сложность расчета запроса с фиксированным результатом (количество данных, отвечающих критериям запроса) – отношение DA к размеру результирующей выборки имеет сложность $O(N \log N)$. Однако при больших D (например, порядка 10^4) $\sqrt[x]{F} \approx 1$ и $W(x+1, |s|) \approx W(x, |s|)$, это, в свою

очередь, означает, что межуровневая группировка данных оказывается неэффективной вследствие уменьшения диапазона рассматриваемых узлов дерева при спуске вниз по дереву индекса. В результате сложность расчета запроса с фиксированным результатом оказывается $O(N)$.

Проблемы индексирования многомерных данных высокой размерности при помощи битовой карты

Метод bitmap-индексирования [11] (метод битовой карты) по сравнению с методом сбалансированных деревьев позволяет реализовать более простую с вычислительной точки зрения технологию организации быстрого поиска данных по многомерным условиям. В основу данной технологии положены идеи, используемые в двоичной вычислительной технике. В методе bitmap-индексирования каждому из возможных значений измерения запроса ставится в соответствие битовая карта, в которую в зависимости от соответствия либо несоответствия значения полей каждой из строк БД значению полей запроса заносятся единицы или нули. При этом последовательность заполнения bitmap-карты повторяет последовательность участвующих в запросе информационных полей БД. Для поиска строк, удовлетворяющих условиям запроса с конъюнкцией, осуществляется битовое умножение карт. После этого оставшиеся в полученном произведении единицы соответствуют номерам строк, удовлетворяющих условию многомерного запроса. Описанная технология доказала свою эффективность и применяется в большинстве современных СУБД.

Данная технология позволяет эффективно определять идентифицирующую информацию строк данных. Однако в ней остается не до конца решенным вопрос доступа к данным, т. к. после нахождения строк, удовлетворяющих условиям запроса, далее по идентифицирующей информации еще необходимо получить собственно значения атрибутов найденных строк (lookup-операция). В терминологии, используемой в СУБД, это означает, что bitmap является некластерным индексом. Для физического

извлечения многомерных данных, например, в Microsoft Analysis Services, судя по комментариям одного из авторов данного метода, размещенным в его блоге [12], используется упорядочивание по кодам Гильберта. Однако в [13] описаны примеры, в которых данный метод оказывается малоэффективным при работе с данными большой размерности.

Проблему, возникающую при использовании lookup-операций для расчета запроса к многомерным данным, можно проиллюстрировать следующим примером. Предположим, что у нас имеется N строк с D измерениями, каждое из которых принимает в среднем M возможных значений. Данную информацию необходимо разместить в блоках данных по F строк так, что для каждого запроса с одним условием (общее количество возможных вариантов – $D \cdot M$), использовалось минимально возможное количество блоков информации DA , к которым придется обратиться при получении доступа к данным, удовлетворяющим критериям запроса. Однако когда $D \gg F$, минимизировать DA невозможно, если среди D измерений нет взаимозависимых. Другими словами, группировка строк данных по одному признаку, приводит к значительным отклонениям по другому признаку.

Здесь необходимо отметить, что в большинстве известных методов пространственного индексирования в значительной степени используется зависимость между измерениями. При этом пространственные индексы могут использовать отдельные локальные зависимости, обнаруживаемые в определенных подмножествах данных, которые, однако, считаются линейными. С нашей точки зрения представляется перспективным в методе bitmap-индексов при доступе к данным в высокой размерности использовать и нелинейные зависимости (например, между группами измерений).

Метод пространственного хеширования

Метод пространственно-чувствительного хеширования (Locality-sensitive hashing – LSH [6]) необходимо упомянуть в связи с тем, что он успешно применяется в

различных областях информационных технологий [14], работающих с многомерными данными большой размерности. Основная идея метода состоит в том, чтобы близким точкам в пространстве генерировать хэш-код, совпадающий с высокой вероятностью.

Применять метод LSH для доступа к данным можно тремя основными способами:

1. Генерировать для запроса и строки данных хэш-код таким образом, чтобы одному запросу соответствовал один хэш-код. Все записи, удовлетворяющие этому запросу, соответственно, должны иметь такой же хэш-код.

2. Генерировать хэш-код так, чтобы одному запросу соответствовало множество (в большинстве случаев – многомерный диапазон (параллелотоп)) хэш-кодов. Соответственно, записи, удовлетворяющие данному запросу, должны иметь один из возможных хэш-кодов – точку многомерного пространства, принадлежащую параллелотопу.

3. Генерировать хэш-код так, чтобы одному запросу соответствовал один хэш-код. При этом большинству записей, удовлетворяющих условию данного многомерного запроса, будет присвоен данный хэш-код.

Первый из описанных способов доступа к данным, по сути, является одномерным методом, поскольку для разных комбинаций измерений потребуются разные хэш-функции.

Второй способ при увеличении числа измерений подвержен «комбинаторному взрыву» объема параллелотопа. Как следствие, их производительность оказывается ниже производительности других известных методов доступа к многомерным данным.

Третий способ не гарантирует получение правильного результата выполнения запроса.

Метод соединения многомерных индексов

Одной из наиболее известных инженерных практик, распространенных в реляционных базах данных при решении данной задачи, является построение отдельного индекса по каждому измерению. При вы-



Структура кластерного индекса однотабличного хранилища многомерных данных

полнении многомерного запроса РСУБД выполняет соединение (join) результатов фильтрации отдельных условий соответствующими им индексами.

Мы предлагаем распространить данный подход на случай многомерных запросов и использовать единый кластерный индекс, структура которого представлена на рисунке. Здесь первая колонка (вершина пирамиды) содержит идентификатор измерения (#). Далее, за идентификатором в индексе размещается колонка индексируемого значения и за ней – строки данных.

К очевидным достоинствам предложенной структуры кластерного индекса однотабличного хранилища многомерных данных следует отнести простоту его построения и надежность (в части снижения вероятности логических ошибок в алгоритмах расчета многомерного запроса). Также важно отметить, что эффективность этого индекса оказывается независимой от количества измерений в индексируемых данных. В то же время можно ожидать, что данный показатель будет достаточно сильно зависеть от количества измерений, представленных в условиях запроса. Действительно, системе доступа к данным потребуется выполнить расчет всех выборок по отдельным условиям запроса, каждая из которых может оказаться значительно масштабнее выборки, соответствующей конъюнкции условий запроса.

Результаты проведенного анализа существующих подходов к организации доступа к данным для расчета многомерных запросов в системах с количеством независимых измерений данных порядка 10^4 показали, что ни один из них не является в полной мере универсальным инструментом решения рассматриваемой проблемы. В этой ситуации существует объективная необходимость в разработке новых подходов к ее решению. При этом представляется перспективным подход, основанный на использовании гибридной технологии, интегрирующей одну или несколько описанных выше методов доступа к многомерным данным. Отметим, что сегодня подобные технологии уже доказали свою эффективность в задачах доступа к многомерным данным с количеством измерений порядка 10^0-10^2 , например, т. н. BR-tree дерево [15], в узлы индекса которого внедрен битовый фильтр Блума [16].

Достоинство битовых карт, которое можно использовать в гибридном методе, – отсутствие явной зависимости производительности расчета запроса от количества измерений индексируемых данных. Поэтому битовые карты используются при решении задачи индексирования 10^4 -мерных данных. Кроме того, при использовании пространственных индексов оказывается возможным использовать локальные нелинейные зависимости между измерениями. Мы ожидаем, что сочетание этих технологий позволит создать систему анализа многомерных данных высокой размерности, в которой время получения результата расчета будет измеряться не десятками минут, а десятками миллисекунд.

Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0055 (проект 2012-218-03-167).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaede V., Günther O. Multidimensional Access Methods // ACM Computer Surveys. – 1998. – Vol. 30. – № 2. – P. 170–231.
2. Greene D. An implementation and performance analysis of spatial data access methods // In Proc. of the 5 IEEE Internat. Conf. on Data Engineering. – 1989. – P. 606–615.
3. Бородин А.М., Поршнев С.В., Сидоров М.А. Использование пространственных ин-

- дексов для обработки аналитических запросов и агрегирования многомерных данных в ИАС // Известия Томского политехн. ун-та. – 2008. – № 5. – С. 64–86.
4. Frialis M. Data Management and Mining in Astrophysical Databases // PhD thesis. – Univ. of Udine, Italy. – 2005.
5. Chang K.T. Introduction to Geographical Information Systems. – New York: McGraw Hill,

2008. — 184 p.

6. **Andoni A., Indyk P.** Near-Optimal Hashing Algorithms for Approximate Nearest Neighbor in High Dimensions // *Communications of the ACM*. — 2008. — Vol. 51. — № 1. — P. 117–122.

7. **Бородин А.М., Поршнева С.В.** Сравнительный анализ возможностей и скорости обработки многомерных данных программными средствами бизнес-аналитики на основе индексирующих структур основной памяти // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — № 1(93). — С. 99–102.

8. **Гулаков В.К., Трубаков А.О.** Многомерные структуры данных. — Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. — 387 с.

9. **Hellerstein J., Naughton J., Pfeffer A.** Generalized Search Trees for Database Systems // *Proc. 21st Int'l Conf. on Very Large Data Bases*. Zürich. Sept., 1995. — P. 562–573.

10. **Бородин А.М., Поршнева С.В.** Аналитические способы оценки эффективности применения пространственных индексов в OLAP-системах // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации.*

Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — № 2(120). — С. 93–100.

11. **Johnson T.** Performance Measurements of Compressed Bitmap Indices // *Proc. of 25th Internat. Conf. on Very Large Data Bases*. Sept. 7–10, 1999. — P. 278–289.

12. **Посуманский М.** Хроника номер 9. «Мы — великие умы» [электронный ресурс] / URL: <http://web.archive.org/web/20040306084024/>, <http://www.mosha.com/XRONIKI/win-xronika9.html> (дата обращения 13.10.2013).

13. **Бородин А.М., Поршнева С.В.** Алгоритмы быстрого доступа к многомерным данным в OLAP-системах. — Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. — 176 с.

14. **Rajaraman A., Ullman J.** Mining of Massive Datasets. — Stanford University, California, 2010. — Ch. 3. — 326 p.

15. **Yu Hua, Xiao Bin, Wang Jianping.** BR-Tree: A Scalable Prototype for Supporting Multiple Queries of Multidimensional Data // *Computers, IEEE Transactions on*. — 2009. — Vol. 58. — Iss. 12. — P. 1585–1598.

16. **Bloom B.H.** Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors // *Communications of the ACM*. — 1970. — Т. 13(7). — P. 422–426.

REFERENCES

1. **Gaede V., Günther O.** Multidimensional Access Methods / *ACM Computer Surveys*. — 1998. — Vol. 30. — № 2. — P. 170–231.

2. **Greene D.** An implementation and performance analysis of spatial data access methods / In *Proc. of the 5 IEEE Internat. Conf. on Data Engineering*. — 1989. — P. 606–615.

3. **Borodin A.M., Porshnev S.V., Sidorov M.A.** Ispol'zovanie prostranstvennykh indeksov dlia obrabotki analiticheskikh zaprosov i agregirovaniia mnogomernykh dannykh v IAS / *Izvestiia Tomskogo politekhn. un-ta*. — 2008. — № 5. — S. 64–86. (rus)

4. **Frialis M.** Data Management and Mining in Astrophysical Databases / PhD thesis. — Univ. of Udine, Italy. 2005.

5. **Chang K.T.** Introduction to Geographical Information Systems. — New York: McGraw Hill, 2008. — P. 184

6. **Andoni A., Indyk P.** Near-Optimal Hashing Algorithms for Approximate Nearest Neighbor in High Dimensions / *Communications of the ACM*. — 2008. — Vol. 51. — № 1. — P. 117–122.

7. **Borodin A.M., Porshnev S.V.** Sravnitel'nyi analiz vozmozhnostei i skorosti obrabotki mnogomernykh dannykh programmnyimi sredstvami biznes-analitiki na osnove indeksiruiushchikh struktur osnovnoi pamiatii / *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii.*

Управление. — St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. — № 1(93). — S. 99–102. (rus)

8. **Gulakov V.K., Trubakov A.O.** Mnogomernye struktury dannykh. — Briansk: Izd-vo BGTU, 2010. — 387 s. (rus)

9. **Hellerstein J., Naughton J., Pfeffer A.** Generalized Search Trees for Database Systems / *Proc. 21st Int'l Conf. on Very Large Data Bases*. — Zürich, Sept. 1995. — P. 562–573.

10. **Borodin A.M., Porshnev S.V.** Analiticheskie sposoby otsenki effektivnosti primeneniia prostranstvennykh indeksov v OLAP-sistemakh / *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Управление*. — St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. — № 2(120). — S. 93–100. (rus)

11. **Johnson T.** Performance Measurements of Compressed Bitmap Indices / *Proc. of 25th Internat. Conf. on Very Large Data Bases*. — Sept. 7–10, 1999. — P. 278–289.

12. **Posumanski M.** Khronika nomer 9. «Мы — velikie umy». Available <http://web.archive.org/web/20040306084024/http://www.mosha.com/XRONIKI/win-xronika9.html> (Accessed 13.10.2013).

13. **Borodin A.M., Porshnev S.V.** Algoritmy bystrogo dostupa k mnogomernym dannyim v OLAP-sistemakh. — Saarbrücken: LAP Lambert Academic

Publishing, 2012. – 176 p.

14. **Rajaraman A., Ullman J.** Mining of Massive Datasets. – Stanford University, California, 2010. – Ch. 3. – 326 p.

15. **Hua Yu, Xiao Bin, Wang Jianping.** BR-Tree: A Scalable Prototype for Supporting Multiple

Queries of Multidimensional Data / Computers, IEEE Transactions. – 2009. – Vol. 58. – Iss. 12. – P. 1585–1598.

16. **Bloom B.H.** Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors / Communications of the ACM. – 1970. – T. 13(7). – P. 422–426.

БОРОДИН Андрей Михайлович – доцент кафедры радиоэлектроники информационных систем Уральского федерального университета, кандидат технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32.

E-mail: amborodin@acm.org

BORODIN, Andrey M. Ural State Federal University.

620002, Mira Str. 32, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: amborodin@acm.org

МИРВОДА Сергей Геннадьевич – ассистент кафедры радиоэлектроники информационных систем Уральского федерального университета.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32.

E-mail: sergey@mirvoda.com

MIRVODA, Sergey G. Ural State Federal University.

620002, Mira Str. 32, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: sergey@mirvoda.com

ПОРШНЕВ Сергей Владимирович – заведующий кафедрой радиоэлектроники информационных систем Уральского федерального университета, доктор технических наук, профессор.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32.

E-mail: sergey_porshnev@mail.ru

PORSHNEV, Sergey V. Ural State Federal University.

620002, Mira Str. 32, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: sergey_porshnev@mail.ru



УДК 004.023

Д.М. Августинов

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА
ПРИ СОЗДАНИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
НОВОСТНОГО ПОТОКА**

D.M. Avgustinov

**APPLICATION OF FREQUENCY ANALYSIS METHODS
FOR NEWS STREAM MARKET FORECASTING COMPUTER PROGRAMMS**

Исследованы и классифицированы основные методы прогнозирования. Изучены основные подходы к построению прогноза на фондовом рынке. Предложен алгоритм прогнозирования финансовых рынков, основанный на методах частотного анализа, а также приведены результаты исследования, полученные с помощью программы на языке Java. В качестве входных данных использованы прогнозы аналитиков фондового рынка. С помощью методов экстраполяции рассчитаны прогнозные оценки исследуемого временного ряда.

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ; ПРОГНОЗИРОВАНИЕ; ВРЕМЕННОЙ РЯД; ФИНАНСОВЫЙ РЫНОК; СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.

The article covers the research of existing forecasting methods and its classification. Basic principles of analysis and forecasting of stock markets are researched. Algorithm of forecasting financial markets based on the frequency analysis is studied in the article. The results of the research obtained with the program in Java are presented. Forecasts of stock market analysts are used as an input. Forward-looking statements of studied time series are calculated with a help of extrapolation methods.

FREQUENCY ANALYSIS; FORECASTING; TIME SERIES; STOCK MARKET; SEMANTIC ANALYSIS.

Финансовый рынок, основную составляющую которого представляет рынок ценных бумаг вместе с рынками банковских ссуд и валюты, в свою очередь вместе с товарным рынком и рынком рабочей силы является системообразующим звеном всего народнохозяйственного рынка [1]. Задачу построения прогноза на финансовом рынке решают тысячи аналитиков по всему миру. От точности их прогноза зависит стабильность экономической системы и объем сбережений миллионов граждан. По данным ресурса investfunds.ru на 30 сентября 2013 г. в России стоимость чистых активов (СЧА) управляющих компаний составляет почти 100 млрд руб. СЧА самой крупной — «Сбербанк Управление Активами» — составляет 23,3 млрд руб. Ежедневно информационные ресурсы публикуют аналитические отчеты квалифицированных

специалистов крупнейших инвестиционных компаний. Оперативно изучить их все не представляется возможным, т. к. ситуация на рынке стремительно меняется. В данной статье описывается метод, позволяющий автоматизировать обработку большого объема информации из аналитических статей для получения прогноза.

**Обзор методов прогнозирования
и основные проблемы**

Основные понятия. При анализе методов прогнозирования в настоящей статье будут использоваться следующие основные понятия [3]:

прогноз — обоснованное суждение о возможном состоянии объекта в будущем или альтернативных путях и сроках достижения этих состояний;

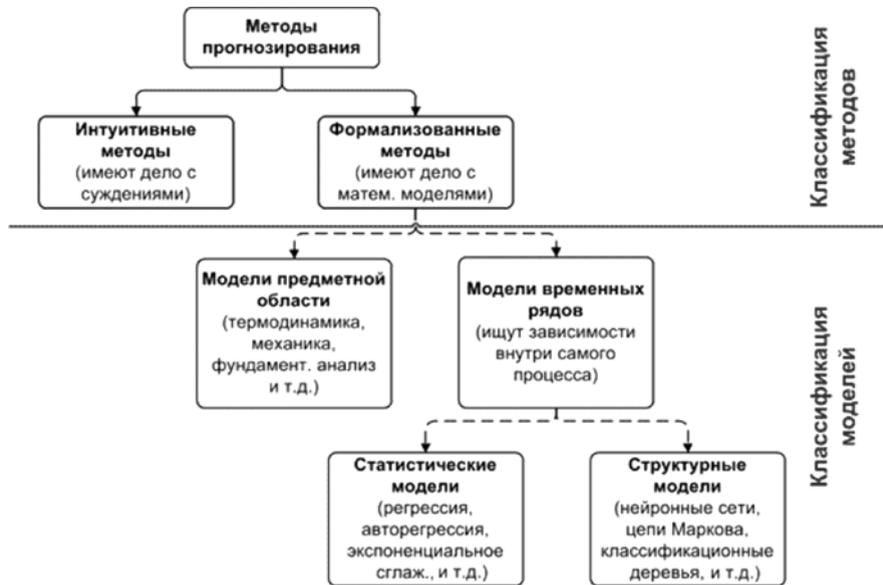


Рис. 1. Классификация методов и моделей прогнозирования

модель прогнозирования – модель объекта прогнозирования, исследование которой позволяет получить информацию о возможных состояниях объекта прогнозирования в будущем и (или) путях и сроках их осуществления;

метод прогнозирования – способ исследования объекта прогнозирования, направленный на разработку прогноза. Методы прогнозирования являются основанием для методик прогнозирования.

В настоящее время существует более 200 методов прогнозирования, однако на практике используется не более десяти. Среди них фактографические (экстраполяция, интерполяция, тренд-анализ), экспертные (в т. ч. опрос, анкетирование), публикационные (в т. ч. патентные), цитатно-индексные, сценарные, матричные, моделирования, аналогий, построения графов и т. д. Наглядная классификация методов и моделей прогнозирования представлена на рис. 1.

Наиболее распространенными методами (свыше 90 % всех сделанных в мире прогнозов) являются экспертиза и фактографические методы. Популярен метод аналогий. Методы линейного программирования, построение циклов (Н.Д. Кондратьев) широко используются в науке [4].

Характеристика методов прогнозирования

развития рынка ценных бумаг. Наиболее известный метод, основанный на обработке множества экспертных суждений, – *метод Дельфи*. Суть метода состоит в анонимном анкетировании экспертов в три-четыре тура. На каждом последующем туре экспертам сообщаются результаты анкетирования и предлагается изменить свое решение. Операции повторяются, пока не будет достигнута согласованность между экспертами или не будет установлено отсутствие единого мнения по проблеме. К недостаткам метода относятся большие затраты времени и средств на каждый этап получения ответов, а также на подготовку статистических результатов.

Также большую популярность набирают консенсус-прогнозы. Центр развития Национального исследовательского университета Высшей школы экономики ежеквартально публикует бюллетень консенсус-прогнозов, основанный на опросе экспертов: опрашивается около тридцати респондентов и формируется консенсус-прогноз по некоторому стандартному набору показателей. В результате ежеквартально публикуется новый прогноз семнадцати социально-экономических показателей (реальный ВВП, номинальный ВВП, объем промышленного производства, оборот розничной торговли, инвестиции в

основной капитал и т. д.)

Компания РосБизнесКонсалтинг (РБК) также формирует консенсус-прогнозы по основным экономическим показателям. Они построены как среднее арифметическое и медиана прогнозов различных российских и зарубежных инвестиционных компаний и брокерских домов, таких, как HSBC, UBS, Raiffeisen Bank, The World Bank, IMF, Bank of America Securities & Merrill Lynch, Deutsche Bank, Сбербанк России, Тройка Диалог, Ренессанс Капитал, ЮниКредитСекьюритиз, Банк Москвы и др. [7]

Данные прогнозы весьма востребованы, однако период обновления составляет, как правило, три месяца, а список показателей ограничен, что не позволяет сформировать прогноз по узкой тематике.

В табл. 1 приведена характеристика наиболее популярных методов построения

прогноза на фондовом рынке [2].

Построение прогноза на основании методов частотного анализа

Предлагаемый метод прогнозирования состоит из следующих этапов:

1. Определение области для прогнозирования.
2. Сбор статей на заданную тематику при помощи экспертного суждения или методов автоматической классификации текстов.
3. Процедура нормализации текстов.
4. Получение частотной характеристики (вектора) каждой статьи (координаты точки в N мерном пространстве) в различные промежутки времени (от 1 до T).
5. Формирование базиса частотных характеристик.
6. Экстраполяция полученных значений координат векторов для нахождения коор-

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов прогнозирования развития рынка ценных бумаг

Название метода	Исходная информационная база	Способы и приемы осуществления	Форма конечного результата
Экспертный	Личные мнения экспертов, коллективная экспертная оценка	Опрос, интервью, анкетирование	Экспертная оценка
Аналитический	Сведения СМИ, ФКЦБ, региональных отделений ФКЦБ	Сравнительный анализ	Аналитические расчеты
Исторической аналогии	Исторические сведения	Установление аналогий	Сценарий развития рынка ценных бумаг
Экономико-математическое моделирование	Данные фундаментального анализа	Расчет экономико-математических зависимостей	Модель
Статистический	Данные статистической отчетности	Расчет индексов, корреляции, регрессии, дисперсии, вариации, ковариации	Фондовые индексы, корреляционно-регрессионная зависимость
Графический	Данные технического анализа	Построение графиков	Тренды
Программно-целевой	Данные органов статистики, экспертов, аналитиков о состоянии рынка ценных бумаг	Определение цели, построение дерева целей и дерева ресурсов	Программа

динат системы в момент времени $T + 1$;

7. Интерпретация полученной экстраполяции в виде прогноза.

Определение области прогнозирования.

Первый этап алгоритма — это определение того параметра или свойства системы, поведение которых мы будем исследовать. Алгоритм главным образом адаптирован для сферы экономики, однако изменение нескольких параметров позволит использовать его и для других областей. Например, в качестве возможных объектов для прогнозирования может быть выбрано направление тренда биржевого индекса или цены акций отдельного эмитента.

Подбор статей для построения прогноза.

На втором этапе необходимо собрать достаточное количество аналитических статей по исследуемому объекту. Разумеется, с ростом числа статей точность прогнозирования будет расти. Стоит отметить, что одному временному промежутку, как правило, соответствует несколько статей. В этом случае статьи объединяются и рассматриваются как одно целое. Многие информационные ресурсы публикуют аналитические прогнозы по графику. Например, компания РБК публикует недельный обзор мировых рынков каждый понедельник. Набор статей можно собрать вручную, например, отбирая периодические (недельные, месячные, квартальные) обзоры биржевых аналитиков на заданную тематику. При необходимости этот процесс можно автоматизировать. На сегодняшний день существует большое количество программ для поиска статей по заданной тематике. Также необходимые статьи можно получить на сайте Яндекс Новости, где возможен поиск по основным новостным финансовым ресурсам.

Нормализация. Алгоритм нормализации позволяет убрать из текста информацию, которая не несет смысловой составляющей. Это означает, что из текста удаляются служебные части речи: предлоги, междометия, союзы и т. д. Также удаляются стоп-слова. Под стоп-словами также понимаются часто употребительные вспомогательные слова, по отдельности не несущие смысловой нагрузки. Примером стоп-слов могут служить:

отдельно стоящие знаки препинания (. , / ? ! ; : ());

цифры (0, 1, 2, 3, 4 и т. д.);

отдельно стоящие буквы алфавита (а, б, в, г, д, е, ..., я);

слова, являющиеся мусорными, по мнению пользователя.

Оставшиеся слова приводятся к своей нормальной словарной форме. Для этого может использоваться алгоритм лемматизации.

Лемматизация — процесс приведения словоформы к лемме — ее нормальной (словарной) форме. Данный процесс возможен с использованием специального словаря, в котором различным словоформам сопоставляются соответствующие леммы.

В русском языке нормальными формами считаются следующие морфологические формы:

для существительных — именительный падеж, единственное число;

для прилагательных — именительный падеж, единственное число, мужской род;

для глаголов, причастий, деепричастий — глагол в инфинитиве.

Примеры: домами — дом; известных — известный; смотрел — смотреть.

Частотные характеристики. На третьем этапе используются частотный анализатор и системный словарь для вычисления частотной характеристика входной статьи.

Частотный анализатор использует метод частотного анализа для анализа текстов естественных языков. На выходе он показывает частоту упоминаний слов в тексте. Перед подсчетом частотной характеристики все слова проходят процедуру нормализации. Для этого каждое слово t_i из текста $T = t_1 t_2 t_3 \dots t_k$ заменяется соответствующей ему лексемой s_i из словаря S . Из текста удаляются служебные части речи и стоп-слова для уменьшения шума. Таким образом получим текст $TN = s_1 s_2 s_3 \dots s_i$.

Затем определим для каждого слова s_i из текста TN его частоту вхождения v_i в данный текст TN . Частотная характеристика — это вектор $v = (v_1, \dots, v_n) \in V$, длина которого равна количеству различных лексем в тексте TN , каждая компонента v_i — целое неотрицательное число.

Частотную характеристику v можно рассматривать как точку в пространстве размерности V , соответствующую тексту T . Таким образом, на входе имеем текст T и словарь S , а на выходе — точку в пространстве V .

Анализируя новостной фон по интересующей тематике, последовательно через равные промежутки времени будем получать частотные характеристики статей и заносить их в базу данных. Получив n необходимых векторов, сформируем базис.

Базис частотных характеристик. После проведения процедуры нормализации и получения частотных характеристик текстов мы получим множество векторов в многомерном пространстве. Размерность пространства у большинства векторов разная, т. к. у текстов разное количество лексем. Различается и состав лексем. Таким образом, полученные векторы являются разнородными, что затрудняет выполнение экстраполяции по их координатам. Следует привести векторы к одной размерности и одинаковому составу лексем. Для этого введем понятие *базис частотных характеристик*.

Мы имеем N векторов вида $v = (v_1, \dots, v_n) \in V$, длина которых равна количеству различных лексем в тексте T_n . Сделаем сортировку лексем по частотности в каждом векторе. Получим векторы вида $v = (v_1, \dots, v_n) \in V$, где $v_n \geq v_{n+1}$.

Определим длину базисного вектора, равную M . Возьмем M самых частотных лексем из каждого вектора, снова отсортируем их между собой и выделим Q наиболее частотных из этого множества. Получим вектор $b = (b_1, \dots, b_q) \in Q$. Данный вектор b — *базис частотных характеристик*.

Далее получим разложение по данному базису каждой частотной характеристики. Получим новые векторы p_1 одинаковой размерности Q .

Данный алгоритм можно отнести к разновидности Латентно-семантического анализа (ЛСА). Метод представляет собой алгоритм обработки информации на естественном языке [9]. Часто применяется для классификации текстов путем извлечения

контекстно-зависимых значений лексических единиц при помощи статистической обработки больших объемов текстов [8].

Экстраполяция полученных результатов. Затем выполним экстраполяцию по полученным координатам. На практике были исследованы следующие методы:

- линейная аппроксимация;
- многочлен Лагранжа;
- кубический сплайн.

Для этого провели исследование на различных комбинациях статей. Размерность множества входящих статей не превышала десяти. Данная размерность обусловлена тем, что аналитические прогнозы, как правило, строятся не более чем на квартал, а за это время по отдельному эмитенту выходит не более десяти промежуточных аналитических статей от одного источника.

Линейная аппроксимация. Построим линейный аппроксимирующий полином для полученных данных. Для этого используем Метод наименьших квадратов (МНК). В качестве параметра x возьмем номер периода изучаемой статьи. В качестве параметра y — значение лексемы из частотной характеристики соответствующей статьи. Таким образом, опишем зависимость y от x уравнением вида $P_1(x) = a_0 + a_1 x$.

Найдем неизвестные коэффициенты a_0 и a_1 по МНК:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i - a_0 n - a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n (y_i x_i) - a_0 \sum_{i=1}^n x_i - a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i x_i). \end{cases}$$

Решим систему уравнений и выразим коэффициенты

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2},$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Получив коэффициенты a_0 и a_1 , можно найти уравнение искомой прямой. Подставив в него значение x в период $T + 1$, получим результат экстраполяции частоты леммы из частотной характеристики

В результате при помощи методов экстраполяции можно получить координаты точки в момент времени $T + 1$. Выполнив экстраполяцию по всем словам из базиса, мы получим частотную характеристику прогнозируемого новостного фона.

Пример использования алгоритма

В качестве объекта исследования возьмем поведение биржевого индекса Dow Jones.

Для этого исследуем еженедельный об-

зор мировых рынков аналитиков компании РБК с 6 мая 2013 г. по 17 июня 2013 г. и попробуем предсказать новостной фон на 24 июня 2013 г. В выбранный промежуток времени было опубликовано семь статей. Оценив их экспертным путем, можно убедиться, что все они описывают состояние мировой экономики и наиболее важные события, влияющие на нее. При помощи нашей программы составим частотную характеристику каждой статьи и затем найдем базис. Получим следующий список слов: *год, данный, квартал, США, рост, пункт, март, уровень, ВВП, объем, Германия, экономика, нефть, рынок.*

Далее получим разложение частотных характеристик каждой статьи по данному базису и выполним аппроксимацию по каждой из них с помощью линейной аппроксимации. Получим следующую таблицу (табл. 2).

Каждый столбец соответствует разбиению отдельной статьи по найденному базису. В столбце за 24 июня показаны результаты разложения статьи, данные которой мы предсказываем. В столбце «Значение» показаны результаты экстраполяции на основании частот первых семи статей. Таким образом, сравнивая реальные результаты частот статьи за 24 июня с полученными нами, можно посчитать точность вычисления, которая представлена как относительная погрешность.

Затем, используя полученные данные, построим прогноз. Наиболее ценную информацию для нас представляют слова *рост* и *объем*. Результат аппроксимации по слову *рост* составляет 0,0141, что немного больше среднего значения (0,0139) по данному слову среди семи исследуемых статей. Можно сделать вывод, что в прогнозе 24 июня будет преобладать положительный фон, т. к. слово *рост* будет часто использоваться в связке с такими словами, как *объем, уровень, ввп, экономика*. Если бы в базисе присутствовали такие слова, как *конкуренция, затраты, издержки*, то сделать однозначный вывод было бы сложно, однако ввиду их отсутствия можно говорить о

Таблица 2

Таблица частотных характеристик статей и результатов прогнозирования

	06.май	13.май	20.май	27.май	03.июн	10.июн	17.июн	24.июн	Значение	Погрешность
	1	2	3	4	5	6	7		0,01242371	21,86%
год	0,033557	0,021452	0,044082	0,018839	0,018032	0,019447	0,015572	0,0159	0,01374943	46,90%
данный	0,012813	0,009488	0,018687	0,011118	0,010756	0,01479	0,01359	0,00936	0,00778043	309,50%
квартал	0,003051	0,003713	0,01677	0,007721	0,006327	0,008217	0,004813	0,0019	0,01693414	7,86%
сша	0,009152	0,007838	0,007187	0,011427	0,01392	0,015886	0,014439	0,0157	0,01411243	66,03%
рост	0,011592	0,015677	0,013896	0,015133	0,014869	0,012051	0,014156	0,0085	0,01221171	27,31%
пункт	0,014033	0,013614	0,006229	0,015133	0,013287	0,014517	0,010476	0,0168	0,000733	10,61%
март	0,012203	0,009076	0,014854	0,002162	0,002847	0,003835	0,004813	0,00082	0,00230929	67,47%
уровень	0,014643	0,007838	0,00575	0,004015	0,004429	0,0063	0,005379	0,0071	0,00266	93,03%
ввп	0,004881	0,0033	0,014375	0,004324	0,004429	0,004656	0,001133	0,001378	0,00631429	43,51%
объем	0,004271	0,014026	0,007187	0,005868	0,004113	0,005478	0,00906	0,0044	-0,00241443	319,49%
германия	0,013423	0,007426	0,006229	0,00525	0,001898	0,001643	0,000849	0,0011	0,00871014	86,11%
экономика	0,004271	0,011551	0,013416	0,007721	0,010756	0,008217	0,006795	0,00468	0,01495871	55,82%
нефть	0	0,000413	0	0,008956	0,012654	0,010408	0,009909	0,0096	0,01324229	9,44%
рынок	0,004271	0,002888	0,000958	0,012353	0,010756	0,007943	0,011608	0,0121	0,01013043	11,91%
индекс	0,008542	0,009488	0,003833	0,011118	0,009807	0,009039	0,009909	0,0115		

Мировые Индексы ▾ D&J-Ind* ▾



Рис. 2. График индекса Dow Jones с мая по июль 2013 г.

положительном тренде.

Высокую погрешность показали два слова: *квартал* и *Германия*. Сильной смысловой нагрузки на исследование тренда эти слова не оказывают, поэтому данное отклонение не повлияет на конечный прогноз. Резкий взлет частотности слова *квартал* объясняется датой прогнозируемой статьи: 24 июня — конец второго квартала. Этот факт, несомненно, вызовет увеличение использования данного слова в прогнозе аналитика.

Так как прогноз делается на неделю, мы предположим, что прогноз аналитика 24 июня на следующую неделю будет оптимистичным, что говорит о том, что мировой рынок будет находиться в зоне положительных новостей и, как следствие, индексы должны идти вверх.

На рис. 2 представлен график индекса Dow Jones с мая по июль 2013 г.

Как видно на графике, с 24 июня зна-

чение индекса показало устойчивое восходящее движение, что совпало с нашими выводами.

Результаты, полученные с помощью предложенного алгоритма, требуют профессиональной интерпретации для построения прогноза. Конечным результатом является не конкретная рекомендация к действию на финансовом рынке, а выявление неявных тенденций в новостном потоке. Как правило, аналитик финансового рынка старается учесть результаты нескольких подходов к прогнозированию рынка. Например, сопоставление данных фундаментально и технического анализа. Таким образом, компьютерная программа, реализующая предложенный алгоритм, является инструментом, позволяющим эксперту автоматизировать процесс обработки большого количества текстов.

Рассмотренный пример оказался удач-

ным с точки зрения результатов прогнозирования. Однако не всегда результаты можно столь однозначно интерпретировать. Нахождение в базе слов, по смысловой нагрузке противоположных друг другу (*расти* и *снижение*, *положительный* и *негатив* и т. д.), существенно усложняет задачу прогнозирования, т. к. нельзя с высокой долей вероятности сказать, к каким смысловым связям они относятся. Эту задачу предстоит или решить в будущем, или хотя бы понять, как интерпретировать подобные результаты и что делать далее.

Важную роль также играет достоверность прогнозов аналитиков, статьи которых используются в исследовании. К примеру, возможна ситуация, когда мы очень точно оценим смысловую нагрузку будущего новостного фона, но рынок поведет себя

иначе из-за заранее трудно предсказуемых событий. Другими словами, прогноз аналитиков окажется неверным.

В данной статье исследован метод построения прогноза состояния финансового рынка с использованием методов частотного анализа на примере статей аналитиков компании РосБизнесКонсалтинг. С этой целью разработан алгоритм анализа текстов, позволяющий строить прогноз о содержании аналитических статей в будущем. В его основе идея рассмотрения аналитических статей в виде частотных характеристик, а также экстраполяция значений частот отдельных слов. Для экспериментальной проверки результатов работы алгоритма разработано программное обеспечение на языке Java.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мисько О.Н. Рынок ценных бумаг: организация и функционирование. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. – С. 91–92.
2. Бердникова Т.Б. Рынок ценных бумаг. – М.: ИНФРА-М, 2002.
3. Писарева О.М. Методы социально-экономического прогнозирования: учебник. – М.: ГУУ–НФПК, 2003. – С. 10.
4. Константиновская Л.В. Методы и приемы прогнозирования [электронный ресурс] / URL: <http://www.astronom2000.info/прогнозирование/mipp/> (дата обращения 01.10.2013).
5. Тузов В.А. Математическая модель языка. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1984.
6. Элдер. А. Как играть и выигрывать на бирже: Психология. Технический анализ. Контроль над капиталом. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 472 с.
7. Турунцева М.Ю. Прогнозирование в России: обзор основных моделей // Экономическая политика. – 2011. – № 1. – С. 193–202.
8. Landauer Th., Foltz P.W., Laham D. Introduction to Latent Semantic. – 1998. – P. 259–284.
9. Deerwester S., Dumais S.T., Furnas G.W., Landauer Th.K., Harshman R. Indexing by Latent Semantic Analysis // J. of the American Society for Information Science. – 1990. – № 41(6). – P. 391–407.

REFERENCES

1. Mis'ko O.N. Rynok tsennykh bumag: organizatsiia i funktsionirovanie. – St.-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2001. – S. 91–92. (rus)
2. Berdnikova T.B. Rynok tsennykh bumag. – Moscow: INFRA-M, 2002. (rus)
3. Pisareva O.M. Metody sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniia: uchebnik. – Moscow: GUU–NFPK, 2003. – S. 10. (rus)
4. Konstantinovskaia L.V. Metody i priemy prognozirovaniia. Available <http://www.astronom2000.info/прогнозирование/mipp/> (Accessed 01.10.2013).
5. Tuzov V.A. Matematicheskaiia model' iazyka. – Leningrad: Izd-vo LGU, 1984. (rus)
6. Elder A. Kak igrat' i vyigryvat' na birzhe: Psikhologiiia. Tekhnicheskii analiz. Kontrol' nad kapitalom. – 4-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2007. – 472 s. (rus)
7. Turuntseva M. Iu. Prognozirovanie v Rossii: obzor osnovnykh modelei / Ekonomicheskaiia politika. – 2011. – № 1. – S. 193–202. (rus)
8. Landauer Th., Foltz P.W., Laham D. Introduction to Latent Semantic Analysis. – 1998. – P. 259–284.
9. Deerwester S., Dumais S.T. Furnas G.W., Landauer T.K., Harshman R. Indexing by Latent Semantic Analysis / J. of the American Society for Information Science. – 1990. – № 41(6). – P. 391–407.

АВГУСТИНОВ Дмитрий Михайлович – аспирант Санкт-Петербургского государственного университета.

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

E-mail: avgustinov@bk.ru

AVGUSTINOV, Dmitry M. *St. Petersburg State University.*

199034, Universitetskaya emb. 7-9, St.-Petersburg, Russia,

E-mail: avgustinov@bk.ru



Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

УДК 004.94

О.М. Зверева, Д.Б. Берг

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КОММУНИКАЦИЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА ЛЕОНТЬЕВА

О.М. Zvereva, D.B. Berg

ECONOMIC SYSTEM AGENT-BASED COMMUNICATION MODEL BASED ON LEONTYEV'S INTERSECTORAL BALANCE

Разработана агент-ориентированная компьютерная модель, реализующая коммуникации между агентами и основанная на уравнениях статического межотраслевого баланса Леонтьева. Коммуникации составляют базис функционирования социальных и экономических систем. С помощью этой модели на основе представления микропроцессов, действий отдельных агентов, можно исследовать состояния макропроцесса – поведения всей социально-экономической системы. В ходе испытаний модели получены интересные результаты о поведении экономической системы в условиях недостаточного количества денежных средств в системе и их дефицита.

МОДЕЛИРОВАНИЕ; АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ; КОММУНИКАЦИИ; МЕЖОТРАСЛЕВОЙ БАЛАНС ЛЕОНТЬЕВА; СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ NETLOGO; СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.

Agent-based computer model has been developed. This model realizes communications between different economic agents and is based on the Leontyev's static intersectoral balance. Communications appear to be the basis of economic and social systems. Starting with the set of modeled microprocesses (behavior of individual agents) we have an opportunity to observe the states of the macroprocess – the behavior of economic system in a whole. While experiments with the model valuable results were received. These results are connected with economic system behavior under the conditions of enough money funds and their lack.

MODELLING; AGENT-BASED MODEL; COMMUNICATIONS; LEONTYEV'S INTERSECTORAL BALANCE; NETLOGO MODELLING FRAMEWORK; STATISTICAL ANALYSIS.

Коммуникации составляют основу функционирования социальных и экономических систем [1]. В каждом коммуникационном акте агенты системы могут обмениваться информацией и смыслами [2], деньгами, услугами, продукцией материального производства, энергией и др.

Для моделирования взаимодействий между большим количеством агентов используется агент-ориентированный подход, результатом расчетов является реализация одного из возможных поведений системы.

Коммуникационные акты часто носят случайный характер, однако действия каждого из агентов, в них участвующих, обусловлены его потребностями в информации, продуктах и услугах.

Макроэкономически потребности отраслей (агентов) в продукции друг друга определяются межотраслевым балансом Леонтьева [3], а для декомпозиции отраслей до уровня предприятий можно использовать балансово-сетевую модель [4]. Однако перечисленные модели являются детерми-

нированными, в них отсутствует возможность исследования влияния условий актов коммуникации на функционирование всей системы.

Цель работы – создание агент-ориентированной модели, основанной на уравнениях межотраслевого баланса Леонтьева, ее компьютерная реализация и верификация. Результаты исследования представлены в данной статье.

Межотраслевой баланс Леонтьева

Наиболее известной макроэкономической балансовой моделью является модель межотраслевого баланса Леонтьева (модель «затраты–выпуск»), за которую автор в 1973 г. получил Нобелевскую премию по экономике [5]. Межотраслевой баланс (МОБ) [4] устанавливает условия обмена произведенной продукцией между смежными отраслями экономики, определяя для каждой отрасли ограничения на потребление сырья (продукции других отраслей) и задавая объем ее собственного выпуска.

Отрасли ($i = 1..n$) производят продукцию в объемах x_i , где \vec{X} ($\vec{X} = \|x_i\|$) – вектор выпуска экономической системы. Для обеспечения своего производства отрасли потребляют продукцию других (смежных) отраслей этой экономической системы в объемах w_{ki} , где w_{ki} – потребность i -й отрасли в продукции k -й отрасли. Для каждой i -й отрасли системы можно говорить о существовании вектора (\vec{W}_i) потребностей в продукции других отраслей.

Потребность i -й отрасли в продукции k -й отрасли (w_{ki}) прямо пропорциональна объему выпуска i -й отрасли (x_i) и определяется технологией производства этой отрасли. Коэффициент пропорциональности $a_{ki} = \frac{w_{ki}}{x_i}$ является безразмерным. Совокупность таких коэффициентов a_{ki} ($k = 1..n$, $i = 1..n$, при условии n отраслей в экономической системе) образует технологическую матрицу ($A = \|a_{ij}\|$). Элемент a_{ki} показывает, какое количество продукции k -го сектора требуется для производства единицы продукции i -го сектора.

Вектор потребностей i -й отрасли имеет вид:

$$\vec{W}_i = [a_{1i}x_i, a_{2i}x_i, \dots, a_{ni}x_i]. \quad (1)$$

В общем случае после обмена произведенной продукцией между отраслями в каждой отрасли остается некоторая часть своей продукции, расходуемая на непроемственное потребление (y_i). Вектор \vec{Y} ($\vec{Y} = \|y_i\|$) – вектор свободных остатков экономической системы.

Статический вариант МОБ Леонтьева определяется следующим уравнением:

$$\vec{X} - A\vec{X} = \vec{Y}. \quad (2)$$

Вектор \vec{X} и \vec{Y} обычно задаются в стоимостном выражении.

Таким образом, статическая модель Леонтьева описывает обмен продукцией между отраслями экономической системы в процессе простого воспроизводства, при этом используются данные за один производственный цикл. В экономической системе процесс перераспределения произведенной продукции реализуется через коммуникации между отдельными экономическими агентами – представителями разных отраслей.

Общее количество агентов экономической системы может быть большим (сотни тысяч и более), и процесс обменов между ними не будет строго детерминированным. В условиях одного и того же макроэкономического межотраслевого баланса возможна реализация различных вариантов коммуникаций между агентами. Для исследования коммуникаций между большим количеством агентов целесообразно использовать агент-ориентированные модели (АОМ).

Имитационные агент-ориентированные модели

Имитационные модели получили широкое распространение с развитием компьютерной техники. В таких моделях вместо уравнений задаются правила взаимодействия (коммуникаций) элементов друг с другом, а процесс расчета заменяется процессом реализации на компьютере этих взаимодействий в течение некоторого времени. В имитационных компьютерных моделях для социальной и экономической сферы основными активными элементами

являются агенты (социальные или экономические), поэтому модели получили название *агент-ориентированных* (Agent-oriented/Agent-based models)[6–9].

Рассмотрим отдельного агента. Время для него изменяется дискретно, а закон изменения его состояния выражается общим для всех агентов набором правил, по которому любой агент на каждом шаге вычисляет свое новое состояние, исходя из своего текущего состояния и состояний других агентов системы. Управляющее правило перехода для i -го агента записывается в виде:

$$S_A^i(t+1) = F(S_A^i(t), \{S_A^j(t), \forall A_j \in A, j \neq i\}), \quad (3)$$

где $S_A^i(t)$ и $S_A^i(t+1)$ – два последовательных во времени состояния i -го агента, а $\{S_A^j(t), \forall A_j \in A, j \neq i\}$ – множество состояний остальных агентов системы в момент времени t . В модели коммуникаций состояние i -го агента в текущий момент времени зависит от его состояния в предыдущий момент времени и состояния того агента, с которым он вступил в коммуникацию.

Отличительной особенностью АОМ является то, что на основе микропроцессов (действий отдельных агентов) можно исследовать макропроцессы (поведение экономической системы в целом).

Таким образом, отдельные акты взаимодействий между агентами (коммуникации) формируют динамику системы в целом аналогично тому, как движение отдельных молекул и атомов определяет термодинамические свойства вещества.

АОМ коммуникаций

В настоящей работе АОМ коммуникаций реализует процессы обмена производственной продукцией между агентами экономической системы в условиях ограничений, определяемых МОБ. Каждая отрасль экономической системы может быть представлена в модели совокупностью агентов с разными производственными характеристиками.

Состояние i -го агента в соответствии с МОБ в момент времени t характеризуется имеющимся у него объемом выпуска ($pr_i(t)$); свободным остатком $ost_i(t)$; векто-

ром необеспеченных потребностей в ресурсах – продукции других агентов системы ($\overline{res}_i(t)$). С целью обеспечения обменов (коммуникаций) введена дополнительная денежная характеристика – состояние денежного счета агента ($mon_i(t)$).

Состояние i -го агента в момент времени t :

$$S_A^i(t) = (pr_i(t), ost_i(t), \overline{res}_i(t), mon_i(t)). \quad (4)$$

В начальный момент времени (при $t = 0$) состояния агентов определяются значениями, рассчитанными на основе МОБ: имеющийся товар равен объему выпуска (x_i), свободный остаток – расчетному свободному остатку (y_i), вектор необеспеченных потребностей в ресурсах – расчетному вектору \overline{W}_i :

$$pr_i(0) = x_i; \quad ost_i(0) = y_i; \quad \overline{res}_i(0) = \overline{W}_i. \quad (5)$$

Агенты в начальный момент времени авансируются, причем этот аванс в конце коммуникативного этапа списывается с их счетов. Аванс определяется коэффициентом обеспеченности деньгами (k_{mon}) и объемом произведенной продукции. Коэффициент обеспеченности деньгами может быть задан одинаковым для всех, а может быть разным для разных агентов.

Величина аванса, зачисляемого на счет агента, вычисляется по формуле:

$$D_i = x'_i \times k_{mon}, \quad (6)$$

где D_i – деньги, занесенные на счет i -го агента в качестве аванса; x'_i – объем товара, привезенный для обмена (объем выпуска за вычетом собственных производственных нужд); k_{mon} – коэффициент обеспеченности деньгами.

Согласно (4–6) состояние i -го агента в начальный момент времени ($t = 0$):

$$S_A^i(0) = (x_i, y_i, \overline{W}_i, D_i). \quad (7)$$

При выполнении условия баланса на конец моделирования ($t = t_k$) состояние i -го агента должно быть:

$$S_A^i(t_k) = (0, y_i, \vec{0}, 0). \quad (8)$$

Схема алгоритма функционирования модели показана на рис. 1.

Агенты вступают в коммуникации в процессе экономических обменов. Весь

обменный процесс состоит из отдельных циклов. В каждом цикле обмена каждому агенту, выбираемому случайным образом, предоставляется возможность однократно вступить в коммуникацию с другим агентом. Целью коммуникации является получение нужного ему ресурса в соответствии

с текущим состоянием вектора потребностей в ресурсах ($\overline{res}_i(t)$). Это возможно, если агент, инициировавший коммуникацию, находится в состоянии готовности к обмену, т. е. у него есть необеспеченные потребности и деньги на счету для оплаты:

$$S_A^i(t) = \begin{cases} \text{"готов"}, & \text{если } (\max(\overline{res}_i(t)) > 0) \text{ И } (mon_i(t) > 0) \\ \text{"не готов"}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

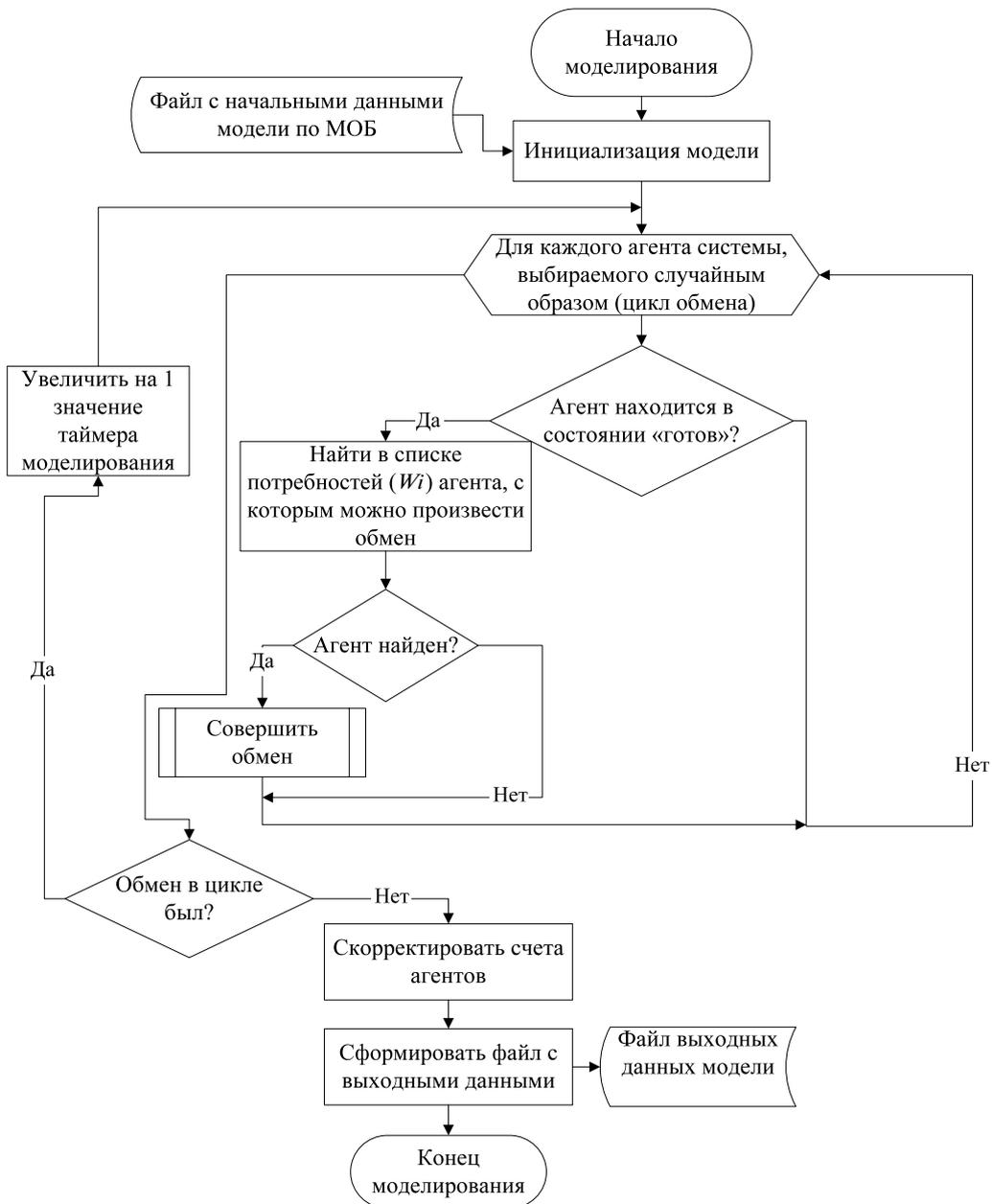


Рис. 1. Схема алгоритма работы модели

Если i -й агент «готов» к обмену, то последовательно по текущему списку потребностей ищется его коммуникант, т. е. тот агент, с кем обмен возможен. Такой агент-коммуникант должен удовлетворять следующим условиям: в его продукции должен нуждаться i -й агент, и у него должна быть в наличии эта продукция. Если агент-коммуникант найден (некоторый j -й агент), то коммуникация считается успешной, и осуществляется обмен в объеме, равном минимальному из трех значений: потребность i -го агента в продукции j -го агента ($res_{ji}(t)$), объем денег на счету i -го агента ($mon_i(t)$), объем продукции, имеющийся у j -го агента в наличии ($pr_j(t)$). Состояния агентов после участия в успешной коммуникации корректируются.

Циклы обмена повторяются до тех пор, пока осуществляются успешные коммуникации. Когда этап коммуникаций заканчивается, со счетов агентов списывается сумма, равная авансу.

По окончании коммуникационного этапа агенты переходят в конечные состояния, которые согласно МОБ должны соответствовать (8).

Применение агент-ориентированной технологии позволило не просто создать динамическую модель, а представить в ней основные этапы деятельности агентов — производство и потребление. Кроме того, это позволило ввести в качестве управляющего элемента деньги для изучения влияния имеющейся в системе денежной массы на поведение системы в целом.

Компьютерная реализация модели и ее верификация

Модель реализована в системе NetLogo на диалекте языка Logo [10]. Вид окна модели представлен на рис. 2. В окне расположено поле моделирования с фигурками агентов на нем, успешные акты коммуникации изображаются графически стрелками, соединяющими агентов. По нажатию кнопки «Старт» происходит инициализация модели, а по нажатию кнопки «Ярмарка» начинается коммуникационный этап. В ходе работы модели выводится ряд значений в панелях-мониторах, а также показываются

графики, отображающие определенные зависимости.

По нажатию кнопки «Производство» запускается производственный этап, но в данной статье он не обсуждается. Для записи результатов моделирования в файл на диске необходимо нажать кнопку «Стоп».

Верификация модели проводилась для семи агентов с одинаковой (в денежном выражении) потребностью в продукции друг друга (все элементы производственной матрицы одинаковые).

Для проведения экспериментов с моделью использованы следующие данные:

$$A = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\bar{X} = [500, 500, 500, 500, 500, 500, 500], \quad (11)$$

$$\bar{Y} = [150, 150, 150, 150, 150, 150, 150], \quad (12)$$

$$\bar{W}_i = [50, 50, 50, 50, 50, 50, 50]. \quad (13)$$

Поскольку все агенты идентичны, рассмотрим динамику удовлетворения потребностей одного из агентов (например, седьмого) в продукции других агентов в процессе коммуникаций друг с другом.

В начале моделирования вектор необеспеченных потребностей в ресурсах у седьмого агента ($\overline{res}_7(0)$) равен вектору расчетных потребностей (\bar{W}_7):

$$\overline{res}_7(0) = \bar{W}_7 = [50, 50, 50, 50, 50, 50, 50]. \quad (14)$$

В конце моделирования при соблюдении МОБ агент должен обеспечить себя ресурсами в нужном количестве, и вектор потребностей в ресурсах должен стать нулевым:

$$\overline{res}_7(t) = \bar{0}. \quad (15)$$

В табл. 1 приведены результаты моделирования для седьмого агента при условии, что коэффициент обеспеченности деньгами равен 0,4. В ячейках таблицы показаны результаты обменов с другими агентами

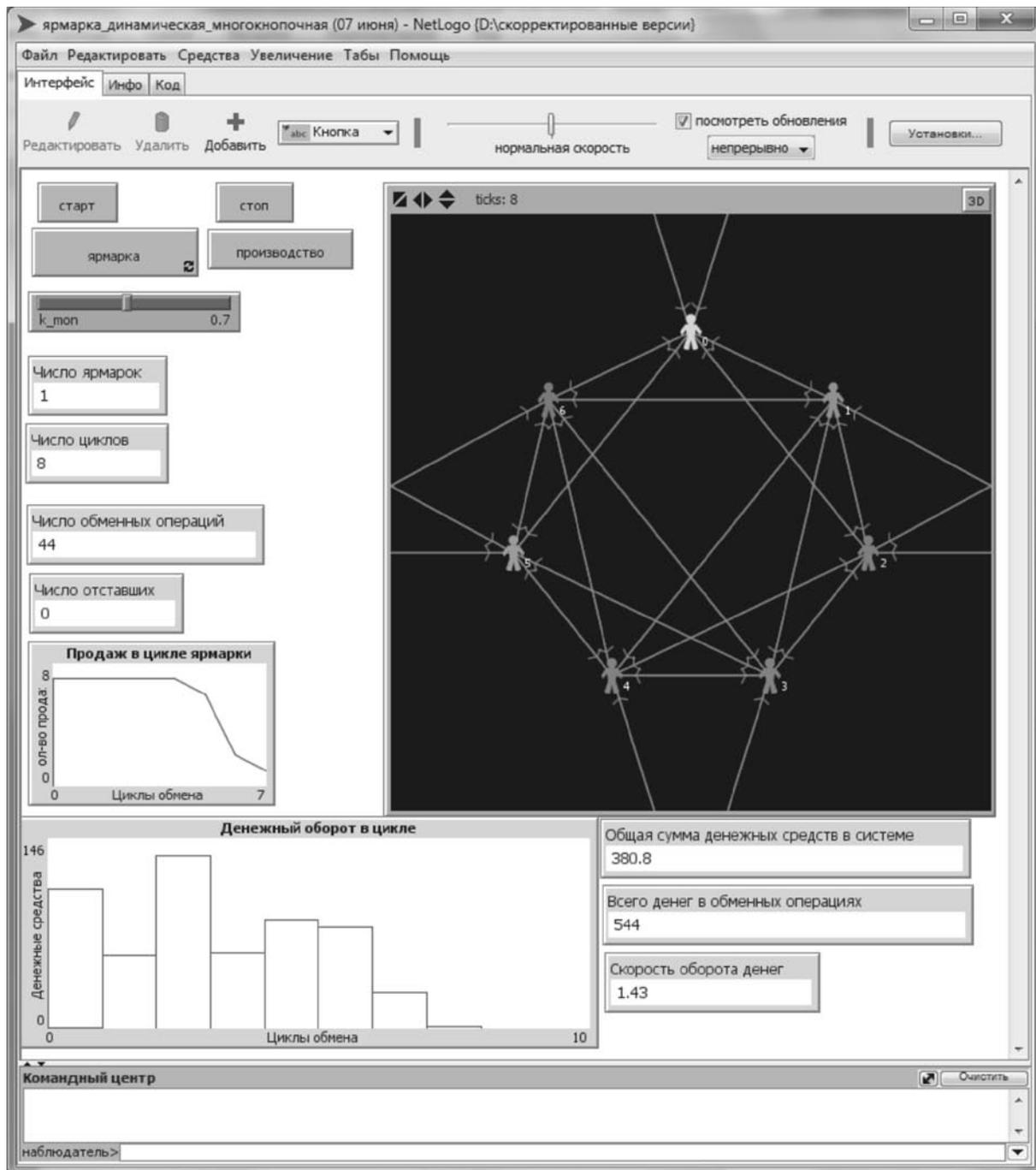


Рис. 2. Вид окна модели

системы (в первом цикле обмена седьмой агент закупил у первого агента продукции на 50 у. е., во втором – у второго – на 50 у. е., в третьем цикле – у третьего агента на сумму 20 у. е., и т. д.). В таблице не показан обмен с седьмым агентом, т. к. свой товар агент сразу оставляет на складе и необходи-

мости в коммуникациях нет.

Из табл. 1 видно, что агент за время коммуникационного этапа удовлетворил свои потребности в ресурсах – результирующий вектор потребностей нулевой (что согласуется с (15)). Таким образом, условие МОБ в разработанной модели соблюдается.

Таблица 1

Динамика удовлетворения потребностей в продукции для одного агента при $k_{мон} = 0,4$

Агент-продавец (i)	Потребность в продукции, у. е. $res_7^i(0)$	В цикле обмена получено агентом, у. е.									Остаточная потребность, у. е. $res_7^i(t_k)$	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	50	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	50	0	0	20	0	0	30	0	0	0	0	0
4	50	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0
5	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
6	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0

Влияние денежной массы на коммуникационную способность агента

Для исследования влияния денежной массы на коммуникационную способность агента проведена серия из 200 экспериментов на тех же (10–13) исходных данных. При изменении коэффициента обеспеченности деньгами $k_{мон}$ от 0,1 до 1,0 измерялись следующие параметры:

объем денежных средств, использованных в отдельном цикле обмена, (M, у. е.);

длительность всего коммуникационного этапа, выраженная в числе циклов обмена, необходимых для полного удовлетворения

потребностей всех агентов в продукции друг друга, N.

На основании полученных данных были рассчитаны статистические характеристики объема денежных средств, использованных в циклах обмена, такие, как среднее значение, значения медианы и моды, значения дисперсии и среднеквадратичного отклонения, которые приведены в табл. 2.

Результаты расчетов показали следующее.

1. Количество циклов обмена, необходимых для удовлетворения потребностей всех агентов в продукции друг друга, монотонно снижается с увеличением обще-

Таблица 2

Статистические характеристики объема денежных средств, использованных для расчетов между агентами в цикле обмена

Тип поведения	$k_{мон}$	Всего денег в системе, у. е.	Среднее значение, у. е.	Среднеквадратическое отклонение, у. е.	Коэффициент вариации	Медиана, у. е.	Мода, у. е.
1	0,10	210	128,57	55,06	42,83	130,00	100,00
	0,20	420	197,77	84,54	42,75	190,00	190,00
	0,30	630	204,88	88,15	43,03	200,00	200,00
2	0,40	840	221,95	103,36	46,57	230,00	350,00
	0,50	1050	257,14	113,62	44,19	300,00	350,00
	0,60	1260	258,46	109,99	42,55	310,00	350,00
	0,70	1470	291,01	107,86	37,07	350,00	350,00
	0,80	1680	295,44	105,09	35,57	350,00	350,00
3	0,90	1890	345,78	35,10	10,15	350,00	350,00
	1,00	2100	350,00	0,00	0,00	350,00	350,00

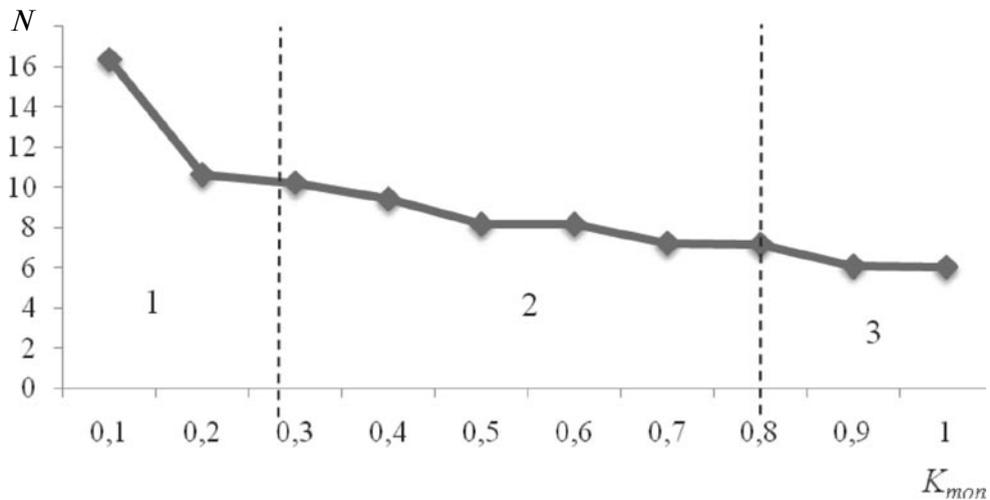


Рис. 3. График зависимости числа циклов обмена N на коммуникационном этапе от коэффициента обеспеченности деньгами k_{mon}

го количества денежной массы в системе (рис. 3), достигая минимально возможного значения (согласно правилам обмена в данной модели) — шесть циклов — при значениях $k_{mon} \geq 0,9$. Полученная зависимость согласуется с известным экономическим правилом, утверждающим, что для обеспечения поддержания экономики в устойчивом состоянии количество денег в обороте должно быть примерно равным объему ВВП страны (это правило соблюдается в таких развитых странах, как США, Герма-

ния и др.).

2. Статистические характеристики количества денег, использованных в каждом цикле обмена (см. табл. 2, рис. 4), позволили выделить три типа динамического поведения системы: 1 — стабильно медленный; 2 — нестабильный; 3 — стабильно быстрый.

Первый тип поведения (при $0,1 \leq k_{mon} \leq 0,3$). Среднее значение объема денежных средств, использованных в каждом цикле, значение моды и медианы близ-

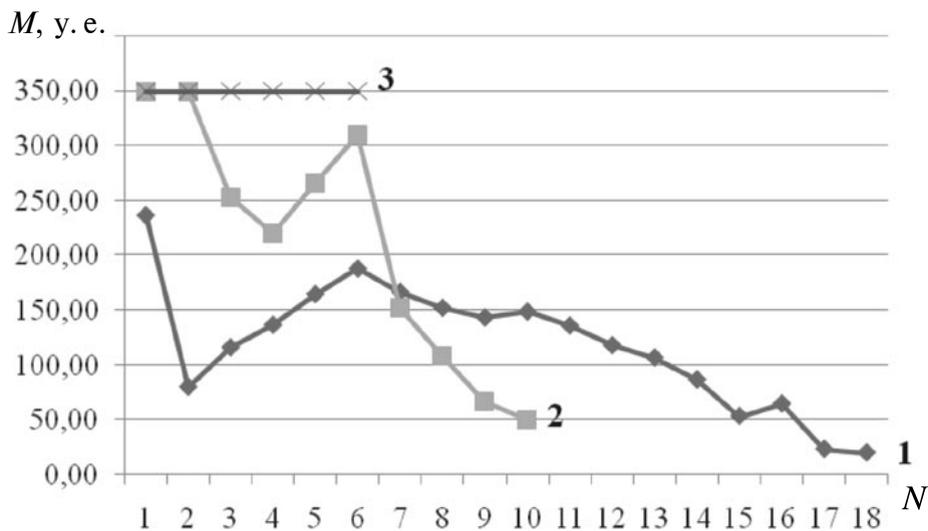


Рис. 4. График зависимости использованных денежных средств от цикла обмена (—◆—) коэффициент 0,1; (—■—) коэффициент 0,4; (—×—) коэффициент 1,0

ки. Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации растут с возрастанием k_{mon} . Денежные средства по циклам обмена распределены достаточно равномерно (при $k_{mon} = 0,2$ составляют примерно 190 у. е. за цикл). Длительность коммуникационного этапа при таком поведении самая большая.

Второй тип поведения (при $0,4 \leq k_{mon} \leq 0,8$). Денежные средства по циклам обмена распределены крайне неравномерно, среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации достигают максимальных значений (особенно при $k_{mon} = 0,4; 0,5$). При $k_{mon} = 0,4$ среднее значение использованных денежных средств в цикле обмена равно 221,95 у. е., а наиболее часто встречающееся значение (значение моды) равно 350 у. е.

Третий тип поведения (при $k_{mon} > 0,8$). Среднее значение объема денежных средств, использованных в каждом цикле, значение моды и медианы практически равны. Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации минимальны (при $k_{mon} = 1$ они равны нулю). Денежные средства по циклам обмена распределены равномерно, коммуникационный этап минимально возможный по длительности. Наиболее устойчивым является вариант функционирования системы при $k_{mon} = 1$: обмены успешно заканчиваются за шесть циклов, в каждом из которых каждый из семи агентов закупает нужное количество товаров у других шести агентов, каждый раз в цикле задействовано 350 у. е.

В настоящей статье предложена агент-ориентированная модель, имеющая макро-

экономические ограничения, определенные межотраслевым балансом Леонтьева. В отличие от традиционной модели Леонтьева в ней реализуются коммуникации между отдельными агентами. Имитация автономных агентов позволяет изучать динамику процесса. С другой стороны, использование в имитационной модели балансовых ограничений делает эту модель более реалистичной с экономической точки зрения.

В рамках данной модели изучено влияние объема денежной массы на структуру и продолжительность обменов между агентами на этапе коммуникаций. Эксперименты проведены для однородной технологической матрицы. Выявлено три типа поведения системы: длительный и достаточно равномерный обмен (количество денежных средств меньше 30 % стоимости товарной массы), нестабильный обмен (обеспеченность деньгами по отношению к товарной массе 40–80 %), быстрый стабильный обмен (количество денег в системе более 80 % стоимости товаров). Нестабильность системы проявляется в значительном разбросе значений объема денежных средств, используемых в цикле обмена (разброс до 50 %). Следствием этого является фактическое недоиспользование денежных средств, которых и так недостаточно в системе.

Работа выполнена в рамках проекта ориентированных фундаментальных исследований, выполняемых в рамках соглашений о сотрудничестве УрО РАН с государственными корпорациями, научно-производственными объединениями, а также в рамках реализации крупных региональных, федеральных и международных проектов № 13-27-008СГ, 2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луман Н. Социальные системы. Очерк общей теории. – Пер. с нем. – СПб.: Наука, 2007. – 668 с.
2. Попков В.В. Экономический конструктивизм. – М.: Книга по требованию, 2013. – 180 с.
3. Леонтьев В.В. Экономические эссе. Теория, исследования, факты и политика. – Пер. с англ. – М.: Политиздат, 1990. – 415 с.
4. Ульянова Е.А. Балансово-сетевая модель аутопоэтических систем в экономике // Известия УрГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 105–110.
5. Нобелевская премия по экономике 1973

[электронный ресурс] / URL: <http://www.nobeliat.ru/laureat.php?id=421> (дата обращения 16.08.2013).

6. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. – М.: Экономика, 2008. – 279 с.
7. Home Page: Leigh Testfation. Agent-Based Computational Economics [электронный ресурс] / URL: <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/> (дата обращения 23.07.2013).
8. Bandini Stefania, Manzoni Sara, Vizzari Giuseppe. Agent Based Modeling and Simulation:

An Informatics Perspective // J. of Artificial Societies and Social Simulation. 12(4). 4 [электронный ресурс] / URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/4.html> (дата обращения 14.07.2013).

9. **Macall C.M., North M.J.** Tutorial on agent-based modelling and simulation // Proc. of the 2005 Winter Simulation Conf. [электронный ресурс] /

URL: <http://eil.stanford.edu/pengao/Papers/Tutorial%20on%20agent-based%20modeling%20and%20simulation.pdf> (дата обращения 22.07.2013).

10. NetLogo Home Page [электронный ресурс] / URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения 16.07.2013).

REFERENCES

1. **Luman N.** Sotsial'nye sistemy. Ocherk obshchei teorii. Per. s nem. – St.-Petersburg: Nauka, 2007. – 668 s. (rus)

2. **Popkov V.V.** Ekonomicheskii konstruktivizm. – Moscow: Kniga po trebovaniu, 2013. – 180 s. (rus)

3. **Leont'ev V.V.** Ekonomicheskie esse. Teorii, issledovaniia, fakty i politika: Per. s angl. – Moscow: Politizdat, 1990. – 415 s. (rus)

4. **Ul'ianova E.A.** Balansovo-setevaia model' autopoeticheskikh sistem v ekonomike / Izvestiia UrGEU. –2011. – № 5. – S. 105-110. (rus)

5. Nobelevskaia premiia po ekonomike 1973. Available <http://www.nobeliat.ru/laureat.php?id=421> (Accessed 16.08.2013).

6. **Bakhtizin A.R.** Agent-orientirovannye modeli ekonomiki. – Moscow: Ekonomika, 2008. – 279 s.

7. Home Page: Leigh Testfason. Agent-Based Computational Economics. Available: <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/> (Accessed 23.07.2013)

8. **Bandini Stefania, Manzoni Sara, Vizzari Giuseppe.** Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective /J. of Artificial Societies and Social Simulation. 12(4). 4. Available <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/4.html> (Accessed 14.07.2013).

9. **Macall C.M., North M.J.** Tutorial on agent-based modelling and simulation / Proc. of the 2005 Winter Simulation Conf. Available: <http://eil.stanford.edu/pengao/Papers/Tutorial%20on%20agent-based%20modeling%20and%20simulation.pdf> (Accessed 22.07.2013).

10. NetLogo Home Page. Available <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (Accessed 16.07.2013).

ЗВЕРЕВА Ольга Михайловна – старший преподаватель кафедры информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: OM-Zvereva2008@yandex.ru

ZVEREVA, Olga M. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: OM-Zvereva2008@yandex.ru

БЕРГ Дмитрий Борисович – профессор кафедры анализа систем и принятия решений Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, заместитель директора по научной работе Института Александра Богданова, доктор физико-математических наук.

620219, Россия, г. Екатеринбург, ГСП-594, ул. Софьи Ковалевской, д. 20а.

E-mail: bergd@mail.ru

BERG, Dmitry B. Institute of Industrial Ecology.

620219, S. Kovalevskaya Str. 20-A, GSP-594, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: bergd@mail.ru



УДК 519.217.4

*О.И. Заяц, С.В. Березин***ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПУГАЧЁВА–СВЕШНИКОВА
К ИССЛЕДОВАНИЮ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ, ЛИНЕЙНЫХ В ЧЕТВЕРТЯХ ПРОСТРАНСТВА***O.I. Zayats, S.V. Berezin***ANALYSIS OF PIECEWISE LINEAR STOCHASTIC SYSTEMS
IN QUARTER-SPACES BY MEANS
OF THE PUGACHEV–SVESHNIKOV EQUATION**

Предложен аналитический метод получения распределения фазовых координат кусочно-линейных стохастических систем, линейных в четвертях пространства. Метод основан на решении уравнения Пугачёва–Свешникова для характеристической функции. Решение последнего сводится к решению параметрической краевой задачи Римана для биполуплоскостей. В качестве примера решена задача Кренделла о вычислении вероятностных характеристик перемещения незакрепленного тела, помещенного на подвижное основание, совершающее случайные колебания. Рассмотрен случай управляемого демпфера сухого трения, который включается, если скорость тела по модулю выше критической. Исследованы асимптотики моментов перемещения и вероятностные характеристики времени, в течение которого демпфер сухого трения выключен (задача Феллера о времени пребывания системы в штатном режиме).

НЕПРЕРЫВНЫЙ МАРКОВСКИЙ ПРОЦЕСС; УРАВНЕНИЕ ПУГАЧЁВА–СВЕШНИКОВА; КРАЕВАЯ ЗАДАЧА РИМАНА ДЛЯ БИПОЛУПЛОСКОСТЕЙ; СТОХАСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА; ЗАДАЧА КРЕНДЕЛЛА; ЗАДАЧА ФЕЛЛЕРА; СУХОЕ ТРЕНИЕ.

An analytic approach is presented to obtain a probability distribution function of the state-vector of piecewise linear systems which have four domains (quarter spaces) of linearity. The approach is based on the use of the Pugachev–Sveshnikov equation for the characteristic function and its reduction to the parametric Riemann Boundary Value Problem for bi-half planes. The Crandall's problem for the controlled dry friction, which is switched off when body's velocity is over a critical level, is solved as an instance of application of the derived theory. The asymptotic behavior of the displacement of a body, placed on a randomly oscillating foundation, and occupation time, while velocity is under the critical level, are explored.

CONTINUOUS MARKOV PROCESS; PUGACHEV–SVESHNIKOV EQUATION; RIEMANN BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR BI-HALF PLANES; STOCHASTIC MECHANICS; CRANDALL'S PROBLEM; FELLER'S PROBLEM; DRY FRICTION.

Необходимость исследования стохастических динамических систем в нелинейной постановке возникает во многих важных прикладных задачах. Встречающиеся на практике нелинейности чрезвычайно разнообразны, но большинство из них допускает кусочно-линейную аппроксимацию. Такие приближения являются одними из наиболее употребительных и повсеместно применяются в самых разнообразных приложениях: физических, механических, электротехнических, радиотехнических, финан-

сово-экономических и многих др.

Систематическое изучение стохастических динамических систем с кусочно-линейными характеристиками началось в середине XX века. Данному кругу проблем посвящено большое количество специальных исследований. Более подробно об этом шла речь в [1]. В настоящее время сколь угодно общие методы, предназначенные для решения именно кусочно-линейных задач и учитывающие их специфику, практически отсутствуют. За исключением систем

первого порядка инженеры и практики вынуждены довольствоваться сугубо численными алгоритмами, либо приближенными подходами типа метода статистической линеаризации (МСЛ).

Один из перспективных современных методов статистической динамики кусочно-линейных систем основан на использовании уравнения Пугачёва–Свешникова (ПС). Первоначально оно предназначалось для исследования систем, включающих нелинейности релейного типа. К этому типу относят нелинейные функции $\varphi(x)$, которые при $|x| > a$, где $a \geq 0$, совпадают со стандартной релейной нелинейностью $\text{sign } x$, а в остальном произвольны. Предложившие этот метод В.С. Пугачёв (при произвольном типе нелинейностей) и А.А. Свешников (при релейном их типе) имели в виду приближенное решение соответствующего уравнения и рассматривали его в качестве альтернативы МСЛ.

Между тем удалось доказать аналитическую разрешимость уравнения ПС в некотором классе систем, включающих нелинейность типа $\text{sign } x$. Первые результаты в этом направлении появились еще при жизни А.А. Свешникова, в конце 70-х гг. В более или менее законченном виде теория представлена в статье [2], где даны три примера аналитического решения. Первый задает распределение скорости вынужденных случайных колебаний при наличии сухого трения, а также при одновременном действии сухого и вязкого трения. Во втором примере найдено распределение абсолютной скорости незакрепленного тела, скользящего с сухим трением вдоль подвижного основания, совершающего случайные колебания. Третий пример посвящен осциллятору с вязким трением и кусочно-постоянной восстанавливающей силой.

Построено аналитическое решение задачи механики твердого тела, поставленной С. Кренделлом. В ней требуется найти распределение перемещений незакрепленного тела на подвижном, стохастически колеблющемся основании при наличии трения между телом и основанием. В работе [3] эта задача решена при сухом трении, а в [4] —

при комбинации сухого и вязкого трения.

Метод уравнения ПС позволяет аналитически находить распределение длительности выбросов. С его помощью для ряда типовых процессов решена задача В. Феллера о распределении времени пребывания процесса на положительной полуоси. Общая теория изложена в статье [5], где указанная задача решена для процессов Н. Винера, Т. Кохи–Дж. Динза, Г. Уленбека–Л. Орнштейна. Аналитическое решение для винеровского процесса с постоянным сносом приведено в [6].

Выше речь шла о системах, включающих нелинейность $\text{sign } x$. Без существенных изменений метод распространяется и на случай нелинейности $|x|$. Это позволило, например, в работах [3, 4] найти распределение пути, проходимого при случайных колебаниях. Для двух этих типов нелинейностей ($\text{sign } x$ и $|x|$) получено не только распределение фазовых координат динамической системы, но и более детальные ее характеристики, такие, как вероятность невыхода фазовых координат за заданные пределы [7] и спектральная плотность в установившемся режиме [8].

Как показано в последней работе [1], вся разработанная ранее для нелинейностей вида $\text{sign } x$ и $|x|$ теория полностью сохраняет свою силу и для произвольных кусочно-линейных систем, линейных в полупространствах. Так называют динамические системы произвольного порядка n , фазовое пространство которых \mathbb{R}^n делится заданной гиперплоскостью Γ на два полупространства, причем в каждом из них процесс эволюции системы описывается линейными уравнениями.

В настоящей статье рассматривается более сложная модель кусочно-линейной динамической системы. Ее порядок $n \geq 2$ по-прежнему считается произвольным, но фазовое пространство \mathbb{R}^n разбивается заданной парой пересекающихся друг друга гиперплоскостей Γ_1 и Γ_2 теперь уже на четыре части (четверти \mathbb{R}^n), представляющие собой области линейности этой кусочно-линейной системы. Опишем исследуемую модель подробнее.

Преобразование уравнений движения

Рассмотрим динамическую систему произвольного порядка n с фазовым вектором $\bar{U} = (U_1, \dots, U_n)^T \in \mathbb{R}^n$. Допустим, что заданы две пересекающиеся гиперплоскости $\Gamma_i \subset \mathbb{R}^n$ ($i = 1, 2$). Без ущерба для общности можно считать, что эти гиперплоскости совпадают с координатными гиперплоскостями U_1 и U_2 . Действительно, если в исходной постановке это условие не выполняется, то следует перейти к новой системе координат, взяв в качестве первых двух базисных векторов нормали к Γ_1 и Γ_2 , а также сдвинуть начало координат в точку, принадлежащую одновременно обеим гиперплоскостям Γ_1 и Γ_2 . После указанных преобразований уравнения гиперплоскостей будут иметь вид

$$\Gamma_i = \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid y_i = 0\}, \quad (i = 1, 2). \quad (1)$$

Уравнение движения системы примем в виде

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \bar{\varphi}(t, \bar{U}) + \Psi(t, \bar{U})\bar{\xi}, \quad (2)$$

$$\bar{U}(0) = \bar{U}_0, \quad (3)$$

где \bar{U} обозначает фазовый вектор; \bar{U}_0 – его начальное значение; $\bar{\xi}$ – стандартный (центрированный, с единичной интенсивностью) гауссовский белый шум. Вектор-функция $\bar{\varphi}$ является линейной, а матрица интенсивностей шумов Ψ – постоянной в каждой из координатных четвертей пространства

$$\begin{aligned} \Omega_{11} &= \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid y_1 > 0, y_2 > 0\}, \\ \Omega_{12} &= \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid y_1 > 0, y_2 < 0\}, \\ \Omega_{21} &= \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid y_1 < 0, y_2 > 0\}, \\ \Omega_{22} &= \{\bar{y} \in \mathbb{R}^n \mid y_1 < 0, y_2 < 0\}, \end{aligned} \quad (4)$$

причем по определению

$$\bar{\varphi}(\tau, \bar{y}) = -C^{(i,j)}(\tau)\bar{y} - \bar{d}^{(i,j)}(\tau), \quad \bar{y} \in \Omega_{ij}, \quad (5)$$

$$\Psi(\tau, \bar{y}) = \sqrt{2}H^{(i,j)}(\tau), \quad \bar{y} \in \Omega_{ij} \quad (6)$$

для всех $i = 1, 2, j = 1, 2$. Для определенности, на особых гиперплоскостях функции $\bar{\varphi}$ и Ψ доопределяются как полусумма предельных значений, соответствующих функций на верхнем и нижнем берегах Γ_i .

Далее преобразуем выражения (4) и (5) с помощью приема, описанного в [1]: выразим функции, линейные в четвертях про-

странства $\Omega_{i,j}$, через произведение функций, линейных во всем пространстве \mathbb{R}^n , на функции знака числа $\text{sign } x$. Для этого вначале введем индикаторные функции квадрантов декартовой системы координат на плоскости:

$$\chi_{ij}(y_1, y_2) = \frac{1 \pm \text{sign } y_1}{2} \cdot \frac{1 \pm \text{sign } y_2}{2}, \quad (7)$$

$(i = 1, 2, j = 1, 2),$

где знак в первой скобке определяется индексом i , а знак во второй скобке – индексом j , причем для индексов, равных единице, выбирается знак плюс, а для равных двойке – минус.

Глобальные представления функций $\bar{\varphi}$ и Ψ с помощью индикаторов (7) выражаются через локальные представления (4) и (5) по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(t, \bar{y}) &= -\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C^{(i,j)}(\tau)\bar{y} + \\ &+ \bar{d}^{(i,j)}(\tau)\chi_{ij}(y_1, y_2), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Psi(t, \bar{y}) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 H^{(i,j)}(\tau)\chi_{ij}(y_1, y_2). \quad (9)$$

Теперь уравнения движения можно переписать в стандартном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{U}}{dt} &+ (C_0 + C_1 \text{sign} U_1 + C_2 \text{sign} U_2 + \\ &+ C_{12} \text{sign} U_1 \text{sign} U_2)\bar{U} + \bar{d}_0 + \bar{d}_1 \text{sign} U_1 + \\ &+ \bar{d}_2 \text{sign} U_2 + \bar{d}_{12} \text{sign} U_1 \text{sign} U_2 = \sqrt{2}(H_0 + \\ &+ H_1 \text{sign} U_1 + H_2 \text{sign} U_2 + H_{12} \text{sign} U_1 \text{sign} U_2)\bar{\xi}, \end{aligned} \quad (10)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{C^{(1,1)} + C^{(1,2)} + C^{(2,1)} + C^{(2,2)}}{4}, \\ C_1 &= \frac{C^{(1,1)} + C^{(1,2)} - C^{(2,1)} - C^{(2,2)}}{4}, \\ C_2 &= \frac{C^{(1,1)} - C^{(1,2)} + C^{(2,1)} - C^{(2,2)}}{4}, \\ C_{12} &= \frac{C^{(1,1)} - C^{(1,2)} - C^{(2,1)} + C^{(2,2)}}{4}, \\ \bar{d}_0 &= \frac{\bar{d}^{(1,1)} + \bar{d}^{(1,2)} + \bar{d}^{(2,1)} + \bar{d}^{(2,2)}}{4}, \\ \bar{d}_1 &= \frac{\bar{d}^{(1,1)} + \bar{d}^{(1,2)} - \bar{d}^{(2,1)} - \bar{d}^{(2,2)}}{4}, \\ \bar{d}_2 &= \frac{\bar{d}^{(1,1)} - \bar{d}^{(1,2)} + \bar{d}^{(2,1)} - \bar{d}^{(2,2)}}{4}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_{12} &= \frac{\bar{d}^{(1,1)} - \bar{d}^{(1,2)} - \bar{d}^{(2,1)} + \bar{d}^{(2,2)}}{4}, \\ H_0 &= \frac{H^{(1,1)} + H^{(1,2)} + H^{(2,1)} + H^{(2,2)}}{4}, \\ H_1 &= \frac{H^{(1,1)} + H^{(1,2)} - H^{(2,1)} - H^{(2,2)}}{4}, \\ H_2 &= \frac{H^{(1,1)} - H^{(1,2)} + H^{(2,1)} - H^{(2,2)}}{4}, \\ H_{12} &= \frac{H^{(1,1)} - H^{(1,2)} - H^{(2,1)} + H^{(2,2)}}{4}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, в уравнениях движения присутствуют четыре группы слагаемых: первая аналогична линейному уравнению, вторая содержит разрывные множители $\text{sign } U_1$ и $\text{sign } U_2$, а третья — произведение этих множителей. Все эти выражения войдут в вектор сноса и матрицу диффузии непрерывного марковского процесса, определяемого (10). При записи уравнения Пугачёва первые две группы слагаемых обрабатываются аналогично [1], а последнее, третье слагаемое требует более детального рассмотрения.

Уравнение Пугачёва–Свешникова

По аналогии со статьей [1] вначале запишем уравнение Пугачёва для характеристической функции процесса \bar{U} , связанной с плотностью $f(\bar{y}; \tau)$ формулой преобразования Фурье:

$$E(\bar{z}; \tau) = M_y [e^{i\bar{z}^T \bar{U}(\tau)}] = \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\bar{z}^T \bar{y}} f(\bar{y}; \tau) dV_y, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \tau} &= M[\Phi(\bar{z} | \bar{U}(\tau), \tau) e^{i\bar{z}^T \bar{U}(\tau)}] = \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\bar{z}^T \bar{y}} \Phi(\bar{z} | \bar{y}, \tau) f(\bar{y}; \tau) dV_y, \end{aligned} \quad (13)$$

где dV_y — элемент объема \mathbb{R}^n , а Φ обозначает функцию Пугачёва

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{z} | \bar{y}, \tau) &= \\ &= \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\tau} M[e^{i\bar{z}^T \Delta\bar{U}} - 1 | \bar{U}(\tau) = \bar{y}]. \end{aligned} \quad (14)$$

Последняя выражается в виде суммы линейной и квадратичной форм относительно компонент вектора \bar{z}

$$\Phi(\bar{z} | \bar{y}, \tau) = i\bar{z}^T \bar{a}(\tau, \bar{y}) - \frac{1}{2} \bar{z}^T \mathbf{B}(\tau, \bar{y}) \bar{z}, \quad (15)$$

причем коэффициенты линейной формы являются компонентами вектора сноса \bar{a} , а квадратичной — элементами матрицы диффузии \mathbf{B} . Решение уравнения (13) ищется при начальном условии

$$E|_{\tau=0} = E_0(\bar{z}). \quad (16)$$

Подставив (15) в (13), принимая во внимание выражение (11) и проведя интегрирование, получим в правой части (13) три типа слагаемых. Первый выражается через характеристическую функцию, второй — через одномерные сингулярные интегралы с ядром Коши, третий — через двумерный сингулярный интеграл с ядром Коши. Двумерные интегралы типа Коши возникают в связи с формулой (см. [9])

$$\begin{aligned} &\int_{\mathbb{R}^n} e^{i\bar{z}^T \bar{y}} \text{sign} y_j \text{sign} y_l f(\bar{y}) dV_y = \\ &= -\frac{1}{\pi^2} v.p. \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_j=s_1, z_l=s_2}}{(s_1 - z_j)(s_2 - z_l)} ds_1 ds_2. \end{aligned} \quad (17)$$

В итоге получим уравнение Пугачёва–Свешникова:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial E}{\partial \tau} + \bar{z}^T C_0 \nabla_{\bar{z}} E + (i\bar{z}^T \bar{d}_0 + \bar{z}^T B_0 \bar{z}) E - \\ &- i \left[\bar{z}^T C_1 \nabla_{\bar{z}} \left(\frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_1=s}}{s - z_1} ds \right) + \right. \\ &+ (i\bar{z}^T \bar{d}_1 + \bar{z}^T B_1 \bar{z}) \left. \left(\frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_1=s}}{s - z_1} ds \right) \right] - \\ &- i \left[\bar{z}^T C_2 \nabla_{\bar{z}} \left(\frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_2=s}}{s - z_2} ds \right) + \right. \\ &+ (i\bar{z}^T \bar{d}_2 + \bar{z}^T B_2 \bar{z}) \left. \left(\frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_2=s}}{s - z_2} ds \right) \right] - \\ &- \left[\bar{z}^T C_{12} \nabla_{\bar{z}} \left(\frac{1}{\pi^2} v.p. \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_1=s_1, z_2=s_2}}{(s_1 - z_1)(s_2 - z_2)} ds_1 ds_2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}_{12} + \bar{z}^T B_{12} \bar{z}) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{1}{\pi^2} v.p. \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_1=s_1, z_2=s_2}}{(s_1 - z_1)(s_2 - z_2)} ds_1 ds_2 \right) \right] = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned}
 B_0 &= \frac{H^{(1,1)} H^{(1,1)T} + H^{(1,2)} H^{(1,2)T} + H^{(2,1)} H^{(2,1)T} + H^{(2,2)} H^{(2,2)T}}{4}, \\
 B_1 &= \frac{H^{(1,1)} H^{(1,1)T} + H^{(1,2)} H^{(1,2)T} - H^{(2,1)} H^{(2,1)T} - H^{(2,2)} H^{(2,2)T}}{4}, \\
 B_2 &= \frac{H^{(1,1)} H^{(1,1)T} - H^{(1,2)} H^{(1,2)T} + H^{(2,1)} H^{(2,1)T} - H^{(2,2)} H^{(2,2)T}}{4}, \\
 B_{12} &= \frac{H^{(1,1)} H^{(1,1)T} - H^{(1,2)} H^{(1,2)T} - H^{(2,1)} H^{(2,1)T} + H^{(2,2)} H^{(2,2)T}}{4}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Для большей краткости и наглядности введем обозначения:

$$\widehat{E}_{12}(\bar{z}; \tau) = \frac{1}{\pi^2} v.p. \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{E|_{z_1=s_1, z_2=s_2}}{(s_1 - z_1)(s_2 - z_2)} ds_1 ds_2, \tag{20}$$

$$\widehat{E}_j(\bar{z}; \tau) = \frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E|_{z_j=s}}{s - z_j} ds,$$

для $j = 1, 2$, тогда уравнение (18) примет вид

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial E}{\partial \tau} + \bar{z}^T C_0 \nabla_{\bar{z}} E + (i\bar{z}^T \bar{d}_0 + \bar{z}^T B_0 \bar{z}) E - \\
 &- i(\bar{z}^T C_1 \nabla_{\bar{z}} \widehat{E}_1 + (i\bar{z}^T \bar{d}_1 + \bar{z}^T B_1 \bar{z}) \widehat{E}_1) - \\
 &- i(\bar{z}^T C_2 \nabla_{\bar{z}} \widehat{E}_2 + (i\bar{z}^T \bar{d}_2 + \bar{z}^T B_2 \bar{z}) \widehat{E}_2) - \\
 &- (\bar{z}^T C_{12} \nabla_{\bar{z}} \widehat{E}_{12} + (i\bar{z}^T \bar{d}_{12} + \bar{z}^T B_{12} \bar{z}) \widehat{E}_{12}) = 0.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Основная идея метода решения, как и в работе [1], основывается на сведении уравнения (21) к краевой задаче Римана теории функций комплексного переменного, однако в отличие от указанной работы, теперь эта задача будет двумерной, а ставиться будет для биполуплоскостей.

Сведение к краевой задаче Римана

Метод сведения сингулярного уравнения к краевой задаче Римана достаточно подробно описан в [1], поэтому мы сконцентрируем внимание только на специфических чертах, присущих сингулярным уравнениям, содержащим *двумерные* сингулярные интегралы с ядром Коши.

Введем в рассмотрение двукратный интеграл типа Коши с плотностью E :

$$\begin{aligned}
 &F(\zeta_1, \zeta_2; \bar{z}', \tau) = \\
 &= \frac{1}{(2\pi i)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{E(\bar{z}; \tau)}{(z_1 - \zeta_1)(z_2 - \zeta_2)} dz_1 dz_2, \tag{22} \\
 &(\text{Im } \zeta_1 \neq 0, \text{Im } \zeta_2 \neq 0),
 \end{aligned}$$

где $\bar{z}' = (z_3, \dots, z_n)^T$. Этот интеграл представляет собой кусочно-аналитическую функцию, которая аналитична по z_1 и z_2 в каждой из биполуплоскостей:

$$D^{\pm\pm} = \{\bar{z} \in \mathbb{C}^n \mid \text{Im } z_1 \geq 0, \text{Im } z_2 \geq 0\}. \tag{23}$$

Ее предельные значения на остове $L = \{(z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2 \mid \text{Im } z_1 = 0, \text{Im } z_2 = 0\}$ биполуплоскостей $D^{\pm\pm}$, определяемые равенством

$$F^{\pm\pm}(z_1, z_2; \bar{z}', \tau) = \lim_{\substack{\zeta_1 \rightarrow z_1 \pm i0 \\ \zeta_2 \rightarrow z_2 \pm i0}} F(\zeta_1, \zeta_2; \bar{z}', \tau), \tag{24}$$

удовлетворяют двумерному варианту формул Ю.В. Сохоцкого [9]:

$$\begin{aligned}
 &F^{++} - F^{+-} - F^{-+} + F^{--} = E, \\
 &i(F^{++} - F^{+-} + F^{-+} - F^{--}) = \widehat{E}_1, \\
 &i(F^{++} + F^{+-} - F^{-+} - F^{--}) = \widehat{E}_2, \\
 &-(F^{++} + F^{+-} + F^{-+} + F^{--}) = \widehat{E}_{12}.
 \end{aligned} \tag{25}$$

В формуле (23) первый и второй знаки в $D^{\pm\pm}$ естественным образом синхронизированы с ограничениями на знак мнимой части чисел z_1 и z_2 , аналогично берутся знаки в (24).

Учитывая формулы Сохоцкого (25), после технически несложных, но громоздких вычислений, уравнение (21) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial F^{++}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(1,1)} \nabla_{\bar{z}} F^{++} + \\
 &+ (i\bar{z}^T \bar{d}^{(1,1)} + \bar{z}^T H^{(1,1)} H^{(1,1)T} \bar{z}) F^{++} - \\
 &- \left[\frac{\partial F^{+-}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(1,2)} \nabla_{\bar{z}} F^{+-} + \right. \\
 &\left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(1,2)} + \bar{z}^T H^{(1,2)} H^{(1,2)T} \bar{z}) F^{+-} \right] -
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[\frac{\partial F^{++}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(2,1)} \nabla_{\bar{z}} F^{++} + \right. \\
 & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(2,1)} + \bar{z}^T H^{(2,1)} H^{(2,1)T} \bar{z}) F^{++} \right] + \quad (26) \\
 & + \frac{\partial F^{--}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(2,2)} \nabla_{\bar{z}} F^{--} + \\
 & + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(2,2)} + \bar{z}^T H^{(2,2)} H^{(2,2)T} \bar{z}) F^{--} = 0.
 \end{aligned}$$

Начальные условия для (26) будут выражаться через распределение f_0 начального фазового вектора \bar{U}_0 по формулам, аналогичным [1]:

$$\begin{aligned}
 F^{\pm\pm} \Big|_{\tau=0} &= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\text{sign} y_1 \pm 1}{2} \times \\
 & \times \frac{\text{sign} y_2 \pm 1}{2} e^{i\bar{z}^T \bar{y}} f_0(\bar{y}) dV_y. \quad (27)
 \end{aligned}$$

Полученная краевая задача схожа со стандартной задачей Римана для биполуплоскостей [9], поэтому за ней далее будет сохранено это традиционное наименование. Однако отличием, существенно усложняющим ее решение, является наличие градиента по \bar{z} и производной по τ . Такого рода краевые задачи Римана, насколько нам известно, в литературе еще не рассматривались.

Наиболее близким из известных авторов аналогов задачи (26) является одномерная краевая задача Римана, возникающая в теории кусочно-линейных стохастических систем, линейных в полупространствах [1]. Напомним, что в указанной задаче в роли контура, на котором ставится краевое условие, выступала вещественная ось $\text{Im } z_1 = 0$. Коэффициенты при самих неизвестных краевых значениях F^\pm были квадратичны по z_1 , а при их производных по z_j — линейны относительно z_1 .

В задаче (26) остов L , на котором ставится краевое условие, представляет собой прямое (декартово) произведение двух вещественных осей $\text{Im } z_1 = 0$ и $\text{Im } z_2 = 0$, причем сохраняется квадратичность коэффициентов при $F^{\pm\pm}$, но теперь уже относительно пары аргументов z_1 и z_2 , а коэффициенты при производных $\frac{\partial F^{\pm\pm}}{\partial z_k}$ по-прежнему

линейны по тем же аргументам. Таким образом, если не принимать во внимание размерность задачи, то новая задача вполне аналогична краевым задачам [1]. Это позволяет применить описанный в [1] метод решения.

Он заключается в переходе от краевого условия к т. н. *основному уравнению*. В краевое условие [1] входила разность двух функций, аналитических, соответственно, при $\text{Im } z_1 > 0$ и $\text{Im } z_1 < 0$. Путем несложных рассуждений, заимствованных из [9] и основанных на применении теоремы Лиувилля, показано, что каждая из указанных двух функций есть линейная функция z_1 , причем ее коэффициенты для обоих слагаемых одинаковы. Задача сводилась к их определению и допускала аналитическое решение методом [2]. В настоящей статье краевое условие (26) содержит уже четыре функции, аналитические в биполуплоскостях $D^{\pm\pm}$, определяемых (24). Все эти четыре функции, как будет показано далее, можно выразить в виде суммы двух линейных функций, каждая от одного из аргументов z_1 либо z_2 с коэффициентами, зависящими от другого из указанных аргументов, причем эти коэффициенты являются аналитическими в соответствующих полуплоскостях. Метод основного уравнения сохраняет свою силу и в этом случае, хотя теперь приходится определять неизвестные коэффициенты, при дополнительном условии их аналитичности в соответствующих полуплоскостях. Все это вносит существенное усложнение по сравнению с задачей [1].

Здесь уместно вспомнить замечание Ф.Д. Гахова о различии двумерных и одномерных задач Римана. Он считал это различие примерно таким же, как различие между дифференциальными уравнениями в частных производных и обыкновенными дифференциальными уравнениями [9]. Подчеркнем важное отличие рассматриваемой здесь задачи от задачи [1]. Нестандартность задачи [1] обусловлена только наличием производных по параметрам в краевом условии. Решение одномерной задачи Римана без этих производных хорошо известно и было найдено в общем виде Га-

ховым еще в середине XX века. Решение же классической задачи Римана для биполуплоскостей в общем виде в настоящее время еще не получено: оно построено лишь для некоторых частных случаев задания коэффициентов [11].

Метод основного уравнения, разумеется, также не дает самого общего вида решения, однако он эффективен для тех краевых задач, которые возникают в теории кусочно-линейных стохастических систем. Далее изложим вывод основного уравнения применительно к задаче (26).

Вначале проведем *сепарацию* левой части уравнения (26) по одному из аргументов z_1 или z_2 , скажем, по z_1 . Под сепарацией здесь понимается представление функции комплексного аргумента z_1 в виде разности двух функций \mathcal{F}^+ и \mathcal{F}^- , аналитических по z_1 , соответственно, в верхней и нижней полуплоскостях, т. е. преобразование уравнения (26) к виду

$$\mathcal{F}^+ - \mathcal{F}^- = 0, \quad (z_1, z_2) \in L, \quad (28)$$

где, очевидно, следует принять

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^+ = & \frac{\partial F^{++}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(1,1)} \nabla_{\bar{z}} F^{++} + \\ & + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(1,1)} + \bar{z}^T H^{(1,1)} H^{(1,1)T} \bar{z}) F^{++} - \\ & - \left[\frac{\partial F^{+-}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(1,2)} \nabla_{\bar{z}} F^{+-} + \right. \\ & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(1,2)} + \bar{z}^T H^{(1,2)} H^{(1,2)T} \bar{z}) F^{+-} \right], \quad (29) \\ \mathcal{F}^- = & \left[\frac{\partial F^{-+}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(2,1)} \nabla_{\bar{z}} F^{-+} + \right. \\ & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(2,1)} + \bar{z}^T H^{(2,1)} H^{(2,1)T} \bar{z}) F^{-+} \right] - \\ & - \left[\frac{\partial F^{--}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(2,2)} \nabla_{\bar{z}} F^{--} + \right. \\ & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(2,2)} + \bar{z}^T H^{(2,2)} H^{(2,2)T} \bar{z}) F^{--} \right]. \end{aligned}$$

Далее рассмотрим на расширенной комплексной плоскости, соответствующей аргументу z_1 , кусочно-аналитическую функцию \mathcal{F} , которая в верхней полуплоскости совпадает с \mathcal{F}^+ , в нижней с \mathcal{F}^- , а на веще-

ственной оси равняется общему значению этих двух функций:

$$\mathcal{F} = \begin{cases} \mathcal{F}^+, & \text{Im } z_1 > 0, \\ \mathcal{F}^-, & \text{Im } z_1 < 0. \end{cases} \quad (30)$$

Так построенная функция \mathcal{F} аналитична во всей плоскости комплексного переменного z_1 . Используя известные асимптотики интеграла типа Коши при $z_1 \rightarrow \infty$ [9], а также тот факт, что функции (29) получаются путем умножения этого интеграла и его производных по параметрам на полиномы не выше чем второго порядка относительно z_1 , заключаем, что порядок \mathcal{F}^\pm по z_1 , а значит и порядок «склеенной» из них функции (30) на бесконечности не выше первого. Отсюда по обобщенной теореме Лиувилля [9] выводим, что \mathcal{F} линейна по z_1 :

$$\mathcal{F} = G_0(z_2, \bar{z}', \tau) + z_1 G_1(z_2, \bar{z}', \tau), \quad (31)$$

где \bar{z}' имеет тот же смысл, что и в (22).

Приравнивая каждую из функций (29) порознь к правой части (31), получаем два уравнения:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial F^{\pm+}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(k,1)} \nabla_{\bar{z}} F^{\pm+} + \right. \\ & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(k,1)} + \bar{z}^T H^{(k,1)} H^{(k,1)T} \bar{z}) F^{\pm+} \right] - \\ & - \left[\frac{\partial F^{\pm-}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(k,2)} \nabla_{\bar{z}} F^{\pm-} + \right. \\ & \left. + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(k,2)} + \bar{z}^T H^{(k,2)} H^{(k,2)T} \bar{z}) F^{\pm-} \right] = \\ & = G_0(z_2, \bar{z}', \tau) + z_1 G_1(z_2, \bar{z}', \tau), \quad (32) \end{aligned}$$

причем значение k определяется здесь первым индексом при $F^{\pm\pm}$: в случае индекса плюс берется $k = 1$, иначе $k = 2$.

Далее используем прием, предложенный в [9]. Вначале сепарируем функции G_j по аргументу z_2 :

$$G_j(z_2, \bar{z}', \tau) = G_j^+(z_2, \bar{z}', \tau) - G_j^-(z_2, \bar{z}', \tau), \quad (33) \\ (j = 0, 1).$$

Затем подставляем (33) в (32), при этом слагаемые, включающие G_j^+ , добавляем к первой квадратной скобке (32), а члены с G_j^- — ко второй. В результате получаем разность двух слагаемых, просепарированную

по z_2 , напоминающую (28). Повторяя рассуждения, последовавшие за получением (28) и приведшие затем к выводу (32), приходим в итоге к упомянутым выше *основным уравнениям*:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{\pm\pm}}{\partial \tau} + \bar{z}^T C^{(j,l)} \nabla_{\bar{z}} F^{\pm\pm} + (i\bar{z}^T \bar{d}^{(j,l)} + \\ + \bar{z}^T H^{(j,l)} H^{(j,l)T} \bar{z}) F^{\pm\pm} = G_0^{\pm}(z_2, \bar{z}', \tau) + \\ + z_1 G_1^{\pm}(z_2, \bar{z}', \tau) + H_0^{\pm}(z_1, \bar{z}', \tau) + H_1^{\pm}(z_1, \bar{z}', \tau) z_2. \end{aligned} \quad (34)$$

Формула (34) представляет сокращенную форму записи *четырёх* уравнений для различных краевых значений $F^{\pm\pm}$, в которых первый и второй верхний индекс при символе краевого значения интеграла типа Коши может выбираться произвольно, причем первый индекс совпадает с индексом при G_j , а второй – при H_l . Числовые индексы j и l естественным образом синхронизированы с первым и вторым индексами $F^{\pm\pm}$ по правилу, аналогичному правилу выбора индекса k в (32). Относительно компонент \bar{z}' правая часть (34) является целой функцией по соображениям, аналогичным [2].

Отметим, что индексы, которыми снабжены G_j^{\pm} и H_l^{\pm} , точно так же, как и индексы $F^{\pm\pm}$, указывают на аналитичность в соответствующей полуплоскости z_1 и z_2 . Правая часть каждого из четырех основных уравнений (34) содержит по четыре слагаемых, которые выбираются для каждого $F^{\pm\pm}$ так, чтобы не противоречить требованию аналитичности $F^{\pm\pm}$ в соответствующей би-полуплоскости $D^{\pm\pm}$.

Уравнения (34) напоминают основные уравнения, возникающие при рассмотрении кусочно-линейных систем, линейных в полупространствах [1], однако по сравнению с этими последними уравнениями они оказываются более сложными, причем усложнение весьма существенно. Во-первых, число неизвестных функций увеличилось с двух до восьми. Во-вторых, правая часть уже не является линейной функцией всего лишь одного аргумента z_1 , а представляет сумму двух линейных функций от каждого из аргументов z_1 и z_2 с коэффициентами, зависящими от другого аргумента. Наконец, в-третьих, и это самое главное, на коэффи-

циенты указанных линейных функций накладываются дополнительные требования аналитичности в соответствующих полуплоскостях z_1 и z_2 .

Таким образом, решение уравнения Пугачёва–Свешникова (21) свелось к решению некоторой обратной задачи для уравнения (34). Она заключается в нахождении таких восьми функций G_j^{\pm}, H_l^{\pm} в правых частях этих уравнений, которые бы обеспечивали аналитичность четырех краевых значений $F^{\pm\pm}$ в соответствующих би-полуплоскостях $D^{\pm\pm}$. В отличие от случая [2], когда поиск неизвестных в основных уравнениях удалось свести к решению сравнительно простой системы линейных алгебраических уравнений (для систем нулевого и первого типа), рассматриваемая сейчас задача, вообще говоря, приводит к необходимости решения некоторой системы функциональных уравнений специального вида.

Далее рассмотрим пример. Для простоты ограничимся пока случаем кусочно-линейной системы, которая в каждой из четвертей пространства \mathbb{R}^n принадлежит к нулевому типу [2].

Пример. Фрикционное торможение незакрепленного тела при наличии управляемого демпфера сухого трения

Плоское горизонтальное основание совершает случайные продольные колебания. Ускорение основания моделируется процессом белого шума заданной интенсивности h . Сверху на основании помещено незакрепленное тело массы m . Трение между ним и основанием пренебрежимо мало. Допустим, что нормальный (штатный) режим работы системы реализуется, когда скорость тела V относительно основания по модулю не превосходит заданного значения v_{\max} . При $|V| > v_{\max}$ возникает аварийный (нештатный) режим, в котором система частично утрачивает свою работоспособность.

Чтобы избежать таких штатных ситуаций, тело притормаживается с помощью демпфера сухого трения, который включается при $|V| > v_{\max}$ и выдает постоянную силу сопротивления P , направленную на-

встречу движению. Наиболее важной характеристикой такой системы является время, в течение которого система работает в штатном режиме. Задача определения вероятностных характеристик этого времени является типовой задачей теории марковских процессов и известна под названием «задачи о времени пребывания». Соответственно, время работы в нештатном режиме можно трактовать как длительность выбросов V за пределы дозированной области. Метод расчета длительности выбросов марковского процесса, основанный на применении уравнения Пугачёва–Свешникова, изложен в работе [5]. В рассматриваемом примере требуется изучить влияние параметров управления движением тела v_{\max} и P на закон распределения времени T работы системы в штатном режиме, а также на моментные характеристики этого времени.

Уравнение движения такой системы имеет вид

$$m\dot{V} = -P\varphi(V) + mh\xi, \quad V(0) = V_0, \quad (35)$$

где V_0 – начальная скорость тела, а φ – релейная нелинейность с зоной нечувствительности

$$\varphi(v) = \begin{cases} \text{sign } v, & \text{если } |v| > v_{\max} \\ 0, & \text{если } |v| < v_{\max} \end{cases}. \quad (36)$$

Тогда время, в течение которого система находится в штатном режиме, подчиняется уравнению

$$\dot{T} = \frac{1}{2}(\text{sign}(V + v_{\max}) - \text{sign}(V - v_{\max})), \quad T(0) = 0. \quad (37)$$

В безразмерных переменных

$$U = \frac{P}{mh^2}V, \quad \tau = \frac{P^2}{2m^2h^2}t, \quad (38)$$

$$\Theta = \frac{P^2}{2m^2h^2}T, \quad a = \frac{P}{mh^2}v_{\max}$$

уравнения (35) и (37) преобразуются к форме

$$\dot{U} = -\text{sign}(U + a) - \text{sign}(U - a) + \sqrt{2}\xi, \quad (39)$$

$$\dot{\Theta} = (\text{sign}(U + a) - \text{sign}(U - a)) / 2.$$

Далее будем считать, что движение начинается из состояния покоя, так что $U(0) = 0$ и $\Theta(0) = 0$.

Если бы фрикционный демпфер не выключался при $|V| < v_{\max}$, а действовал бы постоянно, что эквивалентно $v_{\max} = 0$, то тогда процесс изменения скорости (35) совпал бы с процессом Кохи–Динза [12]. При этом закон распределения скорости имел бы острый максимум вблизи начала координат. За счет выбора управляющих параметров v_{\max} и P можно изменить качественный вид этого закона, а также форму закона распределения T .

Кусочно-линейная система, описываемая уравнениями (39), вообще говоря, непосредственно не относится ни к системам, линейным в полупространствах, разобранным в [1], ни к системам, линейным в четвертях пространства, изучаемым в настоящей статье, однако она может быть легко приведена к последним с помощью стандартного приема, заключающегося в расширении фазового пространства. Введем трехмерный процесс $\bar{U} = (U_1, U_2, U_3)^T$ с компонентами

$$U_1 = U + a, \quad U_2 = U - a, \quad U_3 = \Theta. \quad (40)$$

Последний описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\text{sign}U_1 - \text{sign}U_2 + \sqrt{2}\xi, \\ \dot{U}_2 &= -\text{sign}U_1 - \text{sign}U_2 + \sqrt{2}\xi, \\ \dot{U}_3 &= (\text{sign}U_1 - \text{sign}U_2) / 2, \end{aligned} \quad (41)$$

$$U_1(0) = a, \quad U_2(0) = -a, \quad U_3(0) = 0, \quad (42)$$

которая, очевидно, уже является частным случаем системы (10).

Для начала будем интересоваться только первыми двумя компонентами процесса \bar{U} , что соответствует системе из двух первых уравнений (41), определяющих усеченный процесс $\bar{U}^* = (U_1, U_2)^T$. Для такой системы матричные коэффициенты

$$C^{(i,j)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad H^{(i,j)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (43)$$

одинаковы для всех четвертей пространства (4), а векторные коэффициенты таковы:

$$\begin{aligned} \vec{d}^{(1,1)} &= -\vec{d}^{(2,2)} = (2, 2)^T, \\ \vec{d}^{(1,2)} &= \vec{d}^{(2,1)} = (0, 0)^T. \end{aligned} \quad (44)$$

Уравнение Пугачёва–Свешникова (21)

при таком задании коэффициентов примет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} + (z_1 + z_2)^2 E + (z_1 + z_2)(\hat{E}_1 + \hat{E}_2) = 0, \quad (45)$$

где \hat{E}_1 и \hat{E}_2 обозначают одномерные преобразования Гильберта от E вида (20), и должно решаться при начальном условии

$$E|_{\tau=0} = e^{ia(z_1 - z_2)}. \quad (46)$$

В соответствии с общей теорией приходим к параметрической краевой задаче Римана:

$$\frac{\partial F^{++}}{\partial \tau} + ((z_1 + z_2)^2 + 2i(z_1 + z_2))F^{++} - \left[\frac{\partial F^{+-}}{\partial \tau} + (z_1 + z_2)^2 F^{+-} \right] - \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}^{++} &= \frac{\tilde{G}_0^+(z_2; p) + z_1 \tilde{G}_1^+(z_2; p) + \tilde{H}_0^+(z_1; p) + z_2 \tilde{H}_1^+(z_1; p)}{(z_1 + z_2)^2 + 2i(z_1 + z_2) + p}, \\ \tilde{F}^{+-} &= \frac{\tilde{G}_0^-(z_2; p) + z_1 \tilde{G}_1^-(z_2; p) + \tilde{H}_0^+(z_1; p) + z_2 \tilde{H}_1^+(z_1; p) - e^{ia(z_1 - z_2)}}{(z_1 + z_2)^2 + p}, \\ \tilde{F}^{-+} &= \frac{\tilde{G}_0^+(z_2; p) + z_1 \tilde{G}_1^+(z_2; p) + \tilde{H}_0^-(z_1; p) + z_2 \tilde{H}_1^-(z_1; p)}{(z_1 + z_2)^2 + p}, \\ \tilde{F}^{--} &= \frac{\tilde{G}_0^-(z_2; p) + z_1 \tilde{G}_1^-(z_2; p) + \tilde{H}_0^-(z_1; p) + z_2 \tilde{H}_1^-(z_1; p)}{(z_1 + z_2)^2 - 2i(z_1 + z_2) + p}, \end{aligned} \quad (49)$$

где, напомним, $\text{Re } p > 0$, а верхние индексы при \tilde{G}_j^\pm и \tilde{H}_i^\pm указывают на аналитичность этих функций по первому аргументу в соответствующей полуплоскости.

Насколько известно нам, метод решения краевых задач Римана для биполуплоскостей, использующий основное уравнение, в литературе ранее не рассматривался. Соответственно, малоизучены и те математические задачи, которые возникают в ходе его реализации. Поэтому поиск неизвестных функций в (49) необходимо описать подробнее.

Обратимся к первому уравнению (49). Для аналитичности \tilde{F}^{++} в D^{++} необходимо, чтобы числитель \tilde{F}^{++} обращался в нуль на той части комплексной гиперповерхности S_{11} определяемой уравнением

$$(z_1 + z_2)^2 + 2i(z_1 + z_2) + p = 0, \quad (50)$$

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{\partial F^{--}}{\partial \tau} + (z_1 + z_2)^2 F^{--} \right] + \\ & + \frac{\partial F^{+-}}{\partial \tau} + ((z_1 + z_2)^2 - 2i(z_1 + z_2))F^{+-} = 0 \end{aligned} \quad (47)$$

при начальных условиях по параметру τ

$$\begin{aligned} F^{++}|_{\tau=0} &= F^{+-}|_{\tau=0} = \\ &= F^{--}|_{\tau=0} = 0, \quad F^{+-}|_{\tau=0} = e^{ia(z_1 - z_2)}. \end{aligned} \quad (48)$$

Экспонента (46) целиком вошла в начальное условие для F^{+-} , т. к. при $a > 0$ она аналитична в расширенной биполуплоскости D^{+-} .

Переходя в краевом условии (47) к изображениям по Лапласу и осуществляя сепарацию изображений краевых значений по биполуплоскостям $D^{\pm\pm}$ так, как это было описано выше, получаем следующую систему основных уравнений в изображениях:

которая содержится в D^{++} .

Изучим подробнее поверхность S_{11} . Разрешив ее уравнение относительно одной из переменных, скажем, z_1 , получим два варианта решения:

$$z_1 = -z_2 - i(1 \pm \sqrt{1+p}), \quad (51)$$

из которых нужно сохранить только вариант со знаком минус перед радикалом, т. к. только для него $(z_1, z_2) \in D^{++}$. Таким образом,

$$z_1 = -z_2 + w^+, \quad (52)$$

где $w^+ = i(\sqrt{1+p} - 1)$, причем $\text{Im } w^+ > 0$ при всех $\text{Re } p > 0$.

Вернемся к изучению аналитичности \tilde{F}^{++} . Для того чтобы числитель \tilde{F}^{++} обратился в нуль на S_{11} , необходимо и достаточно выполнения функционального уравнения

$$\begin{aligned} & \tilde{G}_0^+(z_2; p) + (-z_2 + w^+) \tilde{G}_1^+(z_2; p) + \\ & + \tilde{H}_0^+(-z_2 + w^+; p) + z_2 \tilde{H}_1^+(-z_2 + w^+; p) = 0 \end{aligned} \quad (53)$$

для всех z_2 , при которых $(z_1, z_2) \in D^{++}$. Учитывая линейную связь (52) между z_1 и z_2 на S_{11} , получим, что уравнение (53) выполняется всюду в полосе $0 \leq \text{Im } z_2 \leq \text{Im } w^+$.

Весьма существенно, что указанное уравнение сохраняет силу при $\text{Im } z_2 = 0$, т. е. на всей вещественной оси плоскости комплексного переменного z_2 . При $\text{Im } z_2 = 0$ первые два слагаемых в (53) представляют предельные значения на вещественной оси функций, аналитических в верхней полуплоскости, а последние два (благодаря появлению знака минус перед z_2 под аргументом \tilde{H}_1^+) – предельные значения функций, аналитических в нижней полуплоскости. Следовательно, уравнение (53) задает некоторую краевую задачу Римана для полуплоскостей.

Подобного рода задачи подробно рассмотрены в [1]. Если учтем асимптотику на бесконечности двумерного интеграла типа Коши и проследим вытекающую из нее асимптотику функций \tilde{G}_j^\pm и \tilde{H}_l^\pm , после чего применим к решению (53) метод сепарации, то получим следующий аналог основного уравнения, отвечающий задаче (53):

$$\begin{aligned} & \tilde{G}_0^+(z_2; p) + (-z_2 + w^+) \tilde{G}_1^+(z_2; p) = \\ & = g_0(p) + g_1(p)z_2, \\ & \tilde{H}_0^+(-z_2 + w^+; p) + z_2 \tilde{H}_1^+(-z_2 + w^+; p) = \\ & = -g_0(p) - g_1(p)z_2, \end{aligned} \quad (54)$$

причем уравнения (54) сохраняют силу для любых z_2 из верхней и нижней полуплоскостей соответственно.

Каждое из уравнений (54) задает линейную связь между парой функций \tilde{G}_j^+ , либо \tilde{H}_l^+ (при $j = 0, 1; l = 0, 1$), позволяющую выразить одну функцию каждой из пар че-

рез другую. Условимся исключить из выражений $\tilde{F}^{\pm\pm}$ функции \tilde{G}_0^+ и \tilde{H}_0^+ , сохранив \tilde{G}_1^+ и \tilde{H}_1^+ . Коэффициенты g_0 и g_1 в результирующее выражение для $F^{\pm\pm}$ не войдут, и их вычисление оставим в стороне. Отметим, что второе уравнение (54) удобно заменить на эквивалентное ему уравнение:

$$\begin{aligned} & \tilde{H}_0^+(z_1; p) + (-z_1 + w^+) \tilde{H}_1^+(z_1; p) = \\ & = -g_0(p) - g_1(p)(-z_1 + w^+), \end{aligned} \quad (55)$$

получаемое из (54) заменой z_2 через z_1 согласно (52).

Далее займемся последним уравнением (49), дающим выражение \tilde{F}^{--} . Знаменатель \tilde{F}^{--} обращается в нуль на гиперповерхности S_{22} , уравнение которой отличается от (50) только знаком минус перед второй скобкой. Анализ вида части поверхности S_{22} , лежащей в D^- , приводит к равенству

$$z_1 = -z_2 - w^+, \quad (56)$$

заменяющему аналогичную связь (52) для поверхности S_{11} . Внося очевидные изменения в последующие рассуждения, приходим к следующим уравнениям, обеспечивающим аналитичность \tilde{F}^{--} в D^- :

$$\begin{aligned} & \tilde{G}_0^-(z_2; p) - (z_2 + w^+) \tilde{G}_1^-(z_2; p) = \\ & = h_0(p) + h_1(p)z_2, \\ & \tilde{H}_0^-(z_1; p) - (z_1 + w^+) \tilde{H}_1^-(z_1; p) = \\ & = -h_0(p) - h_1(p)(z_1 + w^+), \end{aligned} \quad (57)$$

причем второе уравнение дается уже в преобразованном виде, аналогичном (55). С помощью (57) исключаем из выражений $\tilde{F}^{\pm\pm}$ функции \tilde{G}_0^- и \tilde{H}_0^- .

Приведем промежуточный вид уравнений, в которых сохранены только функции \tilde{G}_1^\pm и \tilde{H}_1^\pm :

$$\begin{aligned} & \tilde{F}^{++} = \frac{\tilde{G}_1^+(z_2; p) + \tilde{H}_1^+(z_1; p)}{z_1 + z_2 + i(1 + \sqrt{1 + p})}, \\ & \tilde{F}^{+-} = \frac{(z_1 + z_2 + w^+) \tilde{G}_1^-(z_2; p) + (z_1 + z_2 - w^+) \tilde{H}_1^+(z_1; p) - e^{ia(z_1 - z_2)}}{(z_1 + z_2)^2 + p}, \\ & \tilde{F}^{-+} = \frac{(z_1 + z_2 - w^+) \tilde{G}_1^+(z_2; p) + (z_1 + z_2 + w^+) \tilde{H}_1^-(z_1; p)}{(z_1 + z_2)^2 + p}, \end{aligned} \quad (58)$$

$$\tilde{F}^{--} = \frac{\tilde{G}_1^-(z_2; p) + \tilde{H}_1^-(z_1; p)}{z_1 + z_2 - i(1 + \sqrt{1 + p})}. \quad (58)$$

Функции \tilde{F}^{++} и \tilde{F}^{--} здесь уже приведены к надлежащему виду, обеспечивающему их аналитичность, соответственно, в D^{++} и D^{-} .

Аналогичному преобразованию надо подвергнуть и две оставшиеся функции. Их знаменатели совпадают, так что особые гиперповерхности S_{12} и S_{21} будут задаваться одним уравнением:

$$(z_1 + z_2)^2 + p = 0, \quad (59)$$

решение которого относительно z_1 таково:

$$z_1 = -z_2 \pm i\sqrt{p}. \quad (60)$$

Здесь, в отличие от предыдущей ситуации, знак перед радикалом в (60) может быть как плюс, так и минус, и оба этих варианта нужно учесть при изучении аналитичности как \tilde{F}^{++} , так и \tilde{F}^{--} .

Рассуждая аналогично предыдущему, получаем условия аналитичности \tilde{F}^{--} в виде:

$$(\pm i\sqrt{p} - w^+) \tilde{G}_1^+(z_2; p) + (\pm i\sqrt{p} + w^+) \tilde{H}_1^-(z_2 \pm i\sqrt{p}; p) = 0, \quad (61)$$

причем, легко видеть, что $(z_1, z_2) \in D^{+}$, если $\text{Im } z_2 \geq \text{Re } \sqrt{p} > 0$. Уравнение (61) представляет собой сокращенную форму

$$\begin{aligned} \tilde{H}_1^+(z_1; p) &= \frac{e^{2aiz_1}}{(i\sqrt{p} - w^+)e^{-a\sqrt{p}} - (i\sqrt{p} + w^+)e^{a\sqrt{p}}}, \\ \tilde{G}_1^-(z_2; p) &= -\frac{e^{-2aiz_1}}{(i\sqrt{p} - w^+)e^{-a\sqrt{p}} - (i\sqrt{p} + w^+)e^{a\sqrt{p}}}. \end{aligned} \quad (66)$$

Далее находим изображение характеристической функции $\tilde{E}^*(\bar{z}^*; p)$ вспомогательного двумерного процесса \bar{U} по первой формуле Сохоцкого (25), после чего изображение характеристической функции $\tilde{E}_U(z; p)$ исходного процесса $U = (U_1 + U_2) / 2$ находится подстановкой в \tilde{E} векторного аргумента $\bar{z} = (z / 2, z / 2)^T$, что дает

$$\begin{aligned} \tilde{E}_U(z; p) &= \frac{1}{z^2 + p} - \frac{2iA(p)z}{z^2 + p} \times \\ &\times \left(\frac{e^{iaz}}{z + i(\sqrt{1 + p} + 1)} + \frac{e^{-iaz}}{z - i(\sqrt{1 + p} + 1)} \right). \end{aligned} \quad (67)$$

записи двух уравнений, соответствующих разному знаку при $i\sqrt{p}$. Если из этих двух уравнений исключить \tilde{G}_1^+ , получим однородное конечно-разностное уравнение относительно \tilde{H}_1^- :

$$\begin{aligned} (i\sqrt{p} + w^+)^2 \tilde{H}_1^-(-z_2 + i\sqrt{p}; p) - \\ - (-i\sqrt{p} + w^+)^2 \tilde{H}_1^-(-z_2 - i\sqrt{p}; p) = 0. \end{aligned} \quad (62)$$

Решением последнего является $\tilde{H}_1^- = 0$, тогда из (61) следует, что и $\tilde{G}_1^+ = 0$.

Аналогичные рассуждения применительно к функции \tilde{F}^{++} приводят уже к неоднородному разностному уравнению для \tilde{H}_1^+ :

$$\begin{aligned} (i\sqrt{p} - w^+)^2 \tilde{H}_1^+(-z_2 + i\sqrt{p}; p) - \\ - (i\sqrt{p} + w^+)^2 \tilde{H}_1^+(-z_2 - i\sqrt{p}; p) = \\ = (i\sqrt{p} - w^+)e^{-2aiz_2 - a\sqrt{p}} + (i\sqrt{p} + w^+)e^{-2aiz_2 + a\sqrt{p}}, \end{aligned} \quad (63)$$

решение которого будем искать в виде

$$\tilde{H}_1^+(z_1; p) = A(p)e^{2aiz_1}. \quad (64)$$

Подстановка (64) в (63) превращает последнее в тождество, если принять

$$A(p) = \frac{1}{(i\sqrt{p} - w^+)e^{-a\sqrt{p}} - (i\sqrt{p} + w^+)e^{a\sqrt{p}}}. \quad (65)$$

В результате для последних двух оставшихся неизвестными в (58) функций получим окончательно:

Обращение изображения (67) требует громоздких и трудоемких вычислений и для экономии места здесь не приводится. По нашему мнению, основной интерес представляет приведенный выше метод получения \tilde{E}_U , демонстрирующий технологию решения двумерной краевой задачи Римана.

Вместе с тем на основе (67) нетрудно получить ряд ценных в прикладном отношении результатов асимптотического характера при больших τ .

Рассмотрим асимптотику изображения (67) при $p \rightarrow 0$. Вспоминая определение w^+ и $A(p)$, имеем

$$\begin{aligned} \tilde{E}_U(z; p) &= \frac{1}{p}(E_\infty(z) + O(p)), \\ E_\infty(z) &= \frac{2}{(2a+1)z} \left(\frac{e^{iaz}}{z+2i} + \frac{e^{-iaz}}{z-2i} \right). \end{aligned} \quad (68)$$

Используя известные теоремы об асимптотическом разложении оригиналов для изображения по Лапласу [13], находим

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} E_U(z; \tau) = \frac{2}{(2a+1)z} \left(\frac{e^{iaz}}{z+2i} + \frac{e^{-iaz}}{z-2i} \right), \quad (69)$$

что дает стационарное распределение в виде комбинации равномерного и двустороннего усеченного показательного законов распределения

$$f_\infty(u) = \frac{1}{2a+1} \begin{cases} 1, & \text{если } |u| \leq a, \\ e^{-2(|u|-a)}, & \text{если } |u| > a, \end{cases} \quad (70)$$

согласующееся с хорошо известным стационарным решением уравнения Колмогорова

$$B(p, z_3) = \frac{1}{(i\sqrt{p-iz_3} - w^+)e^{-a\sqrt{p-iz_3}} - (i\sqrt{p-iz_3} + w^+)e^{a\sqrt{p-iz_3}}}. \quad (72)$$

Полагая $z = 0$, получим выражение для изображения по Лапласу характеристической функции времени пребывания системы в штатном режиме:

$$\tilde{E}_{U_3}(z_3; p) = \frac{1}{p-iz_3} - \frac{2iB(p, z_3)z_3}{i(1+\sqrt{1+p})(p-iz_3)}, \quad (73)$$

которое используется для получения начальных моментов процесса U_3 , определяемых в виде $m_k(\tau) = M[U_3^k(\tau)]$. Их изображения $\tilde{m}_k(p)$ даются достаточно сложными и громоздкими выражениями, получаемыми путем дифференцирования (73) по z_3 и имеющими следующую асимптотику при $p \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \tilde{m}_1(p) &= \frac{1}{p^2}(m_{1\infty} + O(p)), \\ \tilde{m}_2(p) &= \frac{2}{p^3}(m_{2\infty} + O(p)), \end{aligned} \quad (74)$$

где

$$m_{1\infty} = \frac{2a}{2a+1}, \quad m_{2\infty} = \frac{a(4a+1)}{(2a+1)^2}. \quad (75)$$

В результате при больших τ

$$M[U_3(\tau)] = \frac{2a}{2a+1} \tau(1 + O(\tau^{-1})), \quad (76)$$

ва для систем первого порядка [14].

Вернемся теперь к задаче определения времени пребывания системы в штатном режиме (41), т. е. к исследованию процесса \bar{U} , полученного добавлением третьей компоненты U_3 к вспомогательному двумерному процессу \bar{U} . Легко понять, что добавка третьей компоненты в (41) повлияет только на второе и третье слагаемое в (47) и, как следствие, только на знаменатели второй и третьей формул в (49), в которых появятся добавки к p , равные $-iz_3$ и iz_3 соответственно. Поэтому решение задачи (41) после упрощения будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{(U, U_3)}(z, z_3; p) &= \frac{1}{z^2 + p - iz_3} - \\ &- \frac{iB(p, z_3)}{z^2 + p - iz_3} \left(\frac{2z + z_3}{z + v^+} e^{iaz} + \frac{2z - z_3}{z - v^+} e^{-iaz} \right), \end{aligned} \quad (71)$$

где введено обозначение $v^+ = i(\sqrt{1+p} + 1)$ и

$$M[U_3^2(\tau)] = \frac{a(4a+1)}{(2a+1)^2} \tau^2(1 + O(\tau^{-1})), \quad (76)$$

так что дисперсия и коэффициент вариации времени пребывания системы в штатном режиме будут иметь вид:

$$\begin{aligned} D(U_3(\tau)) &= \frac{a}{(2a+1)^2} \tau^2(1 + O(\tau^{-1})), \\ \gamma(\tau) &= \frac{\sqrt{D(U_3(\tau))}}{M[U_3(\tau)]} = \frac{1}{2\sqrt{a}}(1 + O(\tau^{-1})), \end{aligned} \quad (77)$$

причем дисперсия U_3 имеет максимум по a при $a = 1/2$.

В заключение заметим, что исходная система первого порядка (35) попадает в класс систем, которые могут быть исследованы методом Кохи-Аткинсона [15], однако изложенный в настоящей статье метод, во-первых, дает альтернативный и притом более простой способ получения характеристик процесса \bar{U} , описывающего поведение этой системы, и, во-вторых, позволяет легко получить вероятностные характеристики трехмерного процесса \bar{U} , что принципиально невозможно в методе [15], действие которого ограничивается лишь системами первого порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заяц О.И.** Применение уравнения Пугачёва–Свешникова к исследованию кусочно-линейных стохастических систем, линейных в полупространствах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – № 4-1(182). – С. 128–142.
2. **Заяц О.И.** Статистическая динамика систем релейного типа и уравнение Пугачёва–Свешникова // Изв. вузов. Приборостроение. – 1992. – № 1/2. – С. 8–16.
3. **Заяц О.И.** Решение задачи Кренделла о фрикционном торможении // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, – 2007. – № 1 (49). – С. 244–252.
4. **Заяц О.И., Ильин И.Ю.** Об одной нелинейной стохастической задаче механики твёрдого тела // Труды СПбГТУ. Прикладная математика. – 1999. – № 477. – С. 72–74.
5. **Заяц О.И.** Об аналитическом решении задачи Феллера о длительности выбросов // Труды СПбГТУ. Прикладная математика. – 1996. – № 461. – С. 92–100.
6. **Заяц О.И.** Решение задачи Феллера для винеровского процесса с постоянным сносом // Труды СПбГТУ. Прикладная математика. – 1999. – № 477. – С. 67–72.
7. **Zayats O.I., Belavin I.V.** Application of Pugachev-Sveshnikov equation in reliability theory // III Internat. Conf. Tools for mathematical modelling. Proceedings. – St.-Petersburg: SPbGTU, 2001. – P. 193–200.
8. **Заяц О.И., Шилова Е.В.** Спектральный анализ случайных процессов в кусочно-линейных системах и уравнение Пугачёва–Свешникова // Труды СПбГТУ. Прикладная математика. – 2002. – № 485. – С. 55–69.
9. **Гахов Ф.Д.** Краевые задачи. – М.: Наука, 1977.
10. **Титчмарш Э.** Введение в теорию интегралов Фурье. – М.: КомКнига: УРСС, 2005
11. **Какичев В.А.** Методы решения некоторых краевых задач для аналитических функций двух комплексных переменных. – Тюмень: Изд-во ТГУ, 1978.
12. **Caughey T.K., Dienes J.K.** Analysis of non-linear first order system with a white noise input // J. of applied physics. – 1961. – Vol. 32. – № 11. – P. 2476–2479.
13. **Дёч Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971.
14. **Свешников А.А.** Прикладные методы теории марковских процессов. – СПб.: Лань, 2007.
15. **Atkinson J.D., Caughey T.K.** Spectral density of piecewise linear first order systems excited by white noise // Internat. journal of non-linear mechanics. – 1968. – Vol. 3. – № 2. – P. 137–156.

REFERENCES

1. **Zaiats O.I.** Primeneniia uravneniia Pugacheva-Sveshnikova k issledovaniiu kusochno-lineinykh stokhasticheskikh sistem, lineinykh v poluprostanstvakh / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – № 4-1(182). – S. 128–142. (rus)
2. **Zaiats O.I.** Statisticheskaiia dinamika sistem releinogo tipa i uravnenie Pugacheva-Sveshnikova / Izv. vuzov. Priborostroenie. – 1992. – № 1/2. – S. 8–16. (rus)
3. **Zaiats O.I.** Reshenie zadachi Krendella o friksionnom tormozhenii / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. – St.-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. – № 1(49). – S. 244–252. (rus)
4. **Zaiats O.I., Il'in I.Iu.** Ob odnoi nelineinoi stokhasticheskoi zadache mekhaniki tverdogo tela / Trudy SPbGTU. Prikladnaia matematika. – 1999. – № 477. – S. 72–74. (rus)
5. **Zaiats O.I.** Ob analiticheskome reshenii zadachi Feller'a o dlitel'nosti vybrosov / Trudy SPbGTU. Prikladnaia matematika. – 1996 – № 461. – S. 92–100. (rus)
6. **Zaiats O.I.** Reshenie zadachi Feller'a dlia vinerovskogo protsess'a s postoiannym snosom / Trudy SPbGTU. Prikladnaia matematika. – 1999. – № 477. – S. 67–72. (rus)
7. **Zayats O.I., Belavin I.V.** Application of Pugachev-Sveshnikov equation in reliability theory / III Internat. Conf. Tools for mathematical modelling. Proceedings. – St.-Petersburg: SPbGTU, 2001. – P. 193–200.
8. **Zaiats O.I., Shilova E.V.** Spektral'nyi analiz sluchainykh protsessov v kusochno-lineinykh sistemakh i uravnenie Pugacheva-Sveshnikova / Trudy SPbGTU. Prikladnaia matematika. – 2002. – № 485. – S. 55–69. (rus)
9. **Gakhov F.D.** Kraevye zadachi. – Moscow: Nauka, 1977. (rus)
10. **Titchmarsh E.** Vvedenie v teoriiu integralov Fur'e. – Moscow: KomKniaga: URSS, 2005. (rus)
11. **Kakichev V.A.** Metody resheniia nekotorykh kraevykh zadach dlia analiticheskikh funktsii dvukh kompleksnykh peremennykh. – Tiumen': Izd-vo TGU, 1978. (rus)

12. **Caughey T.K., Dienes J.K.** Analysis of non-linear first order system with a white noise input / Journal of applied physics. — 1961. — Vol. 32. — № 11. — P. 2476–2479.

13. **Dech G.** Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniiu preobrazovaniia Laplasi i Z-preobrazovaniia. — Moscow: Nauka, 1971. (rus)

14. **Sveshnikov A.A.** Prikladnye metody teorii markovskikh protsessov. — St.-Petersburg: Lan', 2007. (rus)

15. **Atkinson J.D., Caughey T.K.** Spectral density of piecewise linear first order systems excited by white noise / Internat. journal of non-linear mechanics. — 1968. — Vol. 3. — № 2. — P. 137–156.

ЗАЯЦ Олег Иванович — доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

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

E-mail: zay.oleg@gmail.com

ZAYATS, Oleg I. St. Petersburg State Polytechnical University.

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

E-mail: zay.oleg@gmail.com

БЕРЕЗИН Сергей Васильевич — аспирант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: servberezin@yandex.ru

BEREZIN, Sergey V. St. Petersburg State Polytechnical University.

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

E-mail: servberezin@yandex.ru

FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS

Warsaw, Poland 7-10 September, 2014



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 a chosen Event by **April 11, 2014** using the FedCSIS submission system.

Accepted and presented papers will be published in the IEEE Xplore Digital Library proceedings entitled "2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)" (pending final approval). 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:

Event proposals due: **October 18, 2013**

Paper submission: **April 11, 2014**

Position paper submission: **May 12, 2014**

Acceptance decision: **May 19, 2014**

Final version of paper submission: **June 17, 2014**

Conference dates: **September 7-10, 2014**

Chair of FedCSIS 2014

Macukow, Bohdan
Faculty of Mathematics and Information
Science, Warsaw University of Technology,
Warsaw, Poland

Chair of the Organizing Committee of FedCSIS 2014

Bryś, Krzysztof
Faculty of Mathematics and Information
Science, Warsaw University of Technology,
Warsaw, Poland

Chairs of FedCSIS Conference Series

Garzha, Maria
Systems Research Institute, Polish Academy
of Sciences, Warsaw
and University of Gdansk, Poland

Maciaszek, Leszek A.
Wroslaw University of Economics, Poland
and Macquarie University, Sydney, Australia

Paprzycki, Marcin
Systems Research Institute, Polish Academy
of Sciences, Warsaw
and Management Academy, Warsaw, Poland



УДК 621.398.725:621.317.727.1

А.И. Заревич

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЯХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ШУНТОВ

A.I. Zarevich

DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR AUTOMATED TESTING OF HIGH-CURRENT SHUNT

Описано применение цифровой обработки сигналов при определении динамических характеристик высоковольтных токовых преобразователей – шунтов. Для определения динамических характеристик импульсы тока на входе шунта и напряжения на его выходе записываются в память цифрового осциллографа. Согласно предложенному алгоритму, для этих сигналов рассчитываются спектры, затем амплитудно- и фазочастотные характеристики шунта определяются как отношение спектра выходного импульса напряжения к спектру импульса входного тока на соответствующих частотах.

ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ТОКА; ТОКОВЫЙ ШУНТ; ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ; АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ.

A digital signal processing method for measuring frequency response function of high-current devices are described. This is based on a joint digital processing of the input short pulse signal and a corresponding output. In order to measure the frequency response function, a short current pulse is applied to the shunt input; input and output signals of the shunt are recorded in a digital oscilloscope memory; then spectra of these two signals are computed. Amplitude and phase responses are determined by the arithmetic ratio of spectral components of the input and output signals at appropriate frequencies.

PULSE CURRENT SOURCE; CURRENT SHUNT; DYNAMIC BEHAVIOUR; TESTING AUTOMATION.

Измерение импульсных токов величинной порядка десятков кА в условиях значительных электромагнитных помех традиционно осуществляется с использованием токовых шунтов [1, 2]. При этом токи могут иметь сложную форму огибающей и сложный спектральный состав. Определение динамических метрологических характеристик токовых шунтов связано с измерениями частотной зависимости малых импедансов, составляющими порядка десятков и сотен микроом [3]. Классические методы определения малых импедансов используют генераторы-калибраторы тока и прецизионные вольтметры. Эти способы

требуют дорогостоящего метрологического оборудования, доступного ограниченному числу специализированных лабораторий. В настоящее время активно разрабатываются импульсные методы определения метрологических характеристик шунтов. В данных методах на вход тестируемого шунта подается короткий импульс тока [4]. С помощью эталонного токового преобразователя и цифрового осциллографа фиксируются входные и выходные сигналы шунта. Далее, с помощью цифровой обработки определяются исследуемые динамические характеристики. Достоинство этих методов заключается в низких требованиях к исхо-

дному импульсному тестирующему сигналу. При практическом применении данного метода возникает ряд задач, связанных с адекватным восстановлением формы импульсного сигнала, искаженного шумами и квантованием аналого-цифровых преобразователей. Решение этих задач лежит в области построения математических моделей, восстанавливающих форму сигнала во временной и спектральной областях [5]. Цель статьи – описание метода цифровой обработки импульсных сигналов для получения амплитудно- и фазочастотной характеристик сильноточного токового шунта.

Определение динамических характеристик токовых шунтов

Задача определения динамических метрологических характеристик токовых шунтов может быть решена путем подачи на вход токового шунта короткого импульса тока. При этом входной и выходной сигналы шунта необходимо записать в память цифрового осциллографа и определить их спектры. Амплитудно- и фазочастотные характеристики определяются по арифметическому отношению спектральных плотностей входного и выходного сигналов на соответствующих частотах. Нами предложен и исследован алгоритм реализации указанного метода для определения частотных характеристик преобразователей тока.

При практическом применении метода зондирующий сигнал может иметь любую форму и должен удовлетворять условиям Дирихле: на исследуемом участке быть кусочно-непрерывным, ограниченным и иметь конечное число экстремумов. Практическое выполнение данных условий является сложной задачей. Так, требование кусочной непрерывности сигнала подразумевает отсутствие разрывов первого рода, которые неизбежно возникают при естественном ограничении длительности числовой последовательности, соответствующей сигналу. Повышение детализации анализа приводит к необходимости уменьшения шага дискретизации и повышения разрядности квантования, что в свою очередь способствует зашумленности сигнала

и, следовательно, увеличивает число локальных экстремумов.

Получаемые в эксперименте входные и выходные сигналы шунта представлены последовательностью из N элементов $x(t_k)$, где t_k – время регистрации k -го элемента в последовательности ($1 \leq k \leq N$); $x(t_k)$ – входной сигнал; $y(t_k)$ – выходной сигнал. Дискретное преобразование Фурье, примененное к сигналам, покажет спектральный состав в виде соответствующих векторов комплексных чисел $X(f_k)$ и $Y(f_k)$:

$$X(f_k) = \sum_{j=1}^N x(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (1)$$

$$Y(f_k) = \sum_{j=1}^N y(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad f_N = \frac{1}{2\pi} e^{-2\pi i/N},$$

где f_k – вектор частот, соответствующий комплексным векторам $X(f_k)$ и $Y(f_k)$, полученный исходя из длины выборки и частоты Найквиста; i – мнимая единица.

Комплексный коэффициент передачи шунта $K(f_k)$ будет определяться по выражению

$$K(f_k) = \frac{Y(f_k)}{X(f_k)}. \quad (2)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи есть амплитудно-частотная характеристика шунта, а его аргумент – фазочастотная характеристика.

В условиях физического эксперимента импульсный сигнал всегда зашумлен и характеризуется нестабильностью амплитуды, длительности и формы огибающей. При этом нестабильность длительности импульсов и условий запуска развертки цифрового осциллографа существенно ограничивает применимость временного усреднения сигналов. В то же время усреднение методом скользящего среднего позволит уменьшить влияние шумов на спектр сигнала.

Для определения окон временного усреднения входного и выходного сигналов шунта W_x и W_y необходимо эти сигналы $x(t_k)$ и $y(t_k)$ разложить в ряд Фурье, а затем определить ширины спектров сигнала по уровню -10 дБ ΔF_x и ΔF_y . Ширина окна усреднения обратно пропорциональна ширине спектра. То есть

$$W_X = \frac{1}{\Delta F_X}, \quad W_Y = \frac{1}{\Delta F_Y}. \quad (3)$$

Тогда исходные сигналы $x(t_k)$ и $y(t_k)$ в результате сглаживания примут усредненные значения, определяемые по формулам:

$$\bar{x}(t_j) = \frac{1}{W_X} \sum_{k=k-\frac{W_X}{2}}^{k+\frac{W_X}{2}} x(t_k), \quad (4)$$

$$\bar{y}(t_j) = \frac{1}{W_Y} \sum_{k=k-\frac{W_Y}{2}}^{k+\frac{W_Y}{2}} y(t_k).$$

Соответственно, дискретное преобразование Фурье, примененное к сглаженным сигналам, даст их спектральный состав:

$$\bar{X}(f_k) = \sum_{j=1}^N \bar{x}(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (5)$$

$$\bar{Y}(f_k) = \sum_{j=1}^N \bar{y}(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}.$$

При постоянном размере выборки N и неизменности длительности развертки цифрового осциллографа, частоты компонентов f_k дискретного преобразования Фурье остаются неизменными и не зависят от смещения сигнала относительно начала выборки. Следовательно, шумы и искажения измеряемых сигналов приведут к случайной погрешности спектральных компонент на фиксированных частотах.

В предположении что случайные погрешности подчинены нормальному закону, повышение точности практического применения метода может быть достигнуто

путем равномерного усреднения по ансамблю реализаций спектральных компонент сглаженных сигналов $\bar{X}(f_k)$ и $\bar{Y}(f_k)$ на фиксированной частоте f_k . При выполнении n измерений входного импульсного сигнала и соответствующего отклика шунта, усредненные спектральные компоненты сигналов $\bar{X}(f_k)$ и $\bar{Y}(f_k)$ находятся по выражениям:

$$\bar{X}(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\bar{X}_j(f_k)| e^{i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \arg(X_j(f_k))}, \quad (6)$$

$$\bar{Y}(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\bar{Y}_j(f_k)| e^{i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \arg(Y_j(f_k))}.$$

Тогда, с учетом (6), коэффициент передачи (2) может быть записан как

$$\bar{K}(f_k) = \frac{\bar{Y}(f_k)}{\bar{X}(f_k)}. \quad (7)$$

Погрешность предложенного метода определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового преобразователя может быть оценена путем определения функции когерентности γ_{xy} между спектральными плотностями сигнала-отклика и тестового сигнала, как предложено в [4, 6]:

$$\bar{\gamma}_{xy}^2(f_k) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \bar{X}_j^*(f_k) \bar{Y}_j(f_k) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |\bar{X}_j(f_k)|^2 \sum_{j=1}^n |\bar{Y}_j(f_k)|^2}. \quad (8)$$

Функция когерентности γ_{xy} , определенная по выражению (8), в идеальном случае

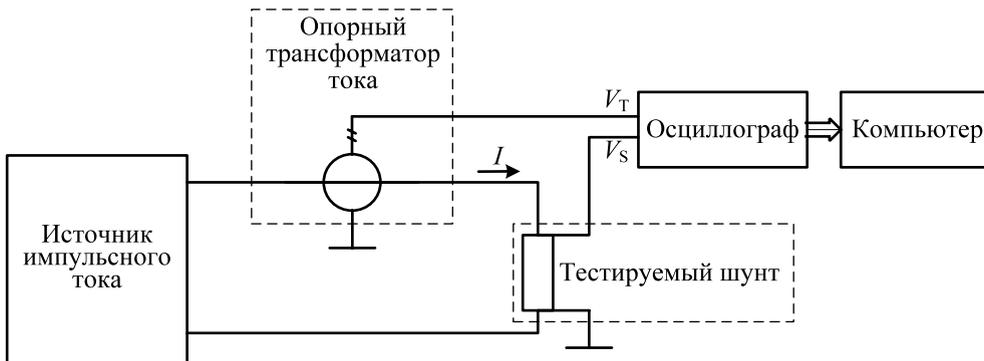


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения динамических характеристик шунтов

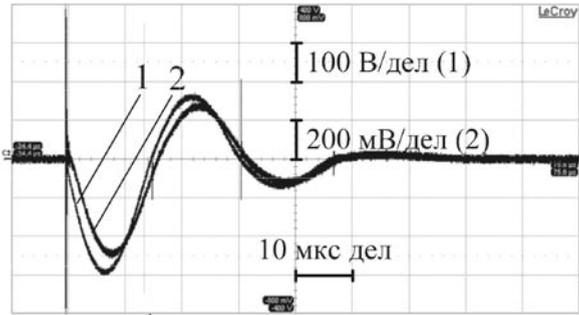


Рис. 2. Сигналы с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2)

равна единице, что соответствует полной корреляции выходного $Y(f)$ и входного $X(f)$ сигналов. Дополнительные шумы, вносимые исследуемой цепью и средствами измерения, а также возможные нелинейные явления уменьшают γ_{xy} . В пределе γ_{xy} стремится к нулю, что соответствует отсутствию причинно-следственной связи между сигналами.

Среднее квадратическое отклонение σ , а следовательно, и относительная погрешность определения коэффициента передачи $K(f_k)$ могут быть получены из выражения (8) следующим образом:

$$\sigma(\bar{K}(f_k)) = \frac{1}{\sqrt{2n}} \frac{\sqrt{1 - \bar{\gamma}_{xy}^2(f_k)}}{|\bar{\gamma}_{xy}(f_k)|}. \quad (9)$$

Полная погрешность измерения должна включать в себя относительную погрешность определения коэффициента передачи, полученную из выражения (9), и погрешности, вносимые используемыми средствами измерения.

На основании изложенных рассуждений предложен алгоритм цифровой обработки импульсных сигналов, получаемых при исследовании преобразователей тока, позволяющий определить амплитудно- и фазочастотные характеристики [7, 8]. Алгоритм реализован на языке технических вычислений MATLAB.

Для определения значения спектральных компонент сигналов на заданных частотах использован алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm) [9]. Это также позволяет экономить память ЭВМ и повышает вы-

числительную эффективность алгоритма. Спектральные компоненты определялись в определенном ранее диапазоне частот сигналов по уровню -10 дБ ΔF_x и ΔF_y .

Экспериментальное определение динамических характеристик токового шунта

Предложенный метод был применен для экспериментального определения частотной зависимости импеданса шунта коаксиальной конструкции, предназначенного для измерения импульсных токов амплитудой до 20 кА [2]. Активное сопротивление шунта составляет порядка 170 мкОм.

Для этого эксперимента был разработан и изготовлен формирователь импульса тока. Формирователь обеспечил получение импульсов тока амплитудой до 20 кА и длительностью до 150 мкс. Схема эксперимента по определению динамических характеристик шунта представлена на рис. 1.

Сигнал с формирователя импульсного тока поступал на входные токовые клеммы исследуемого шунта и одновременно фиксировался с помощью широкодиапазонного трансформатора тока с коэффициентом преобразования тока в напряжение 0,1. Сигналы с трансформатора тока и потенциальных выводов исследуемого шунта регистрировались двухканальным цифровым осциллографом.

Для измерения тока использовался установленный трансформатор тока 13W0100 производства фирмы Lilco Ltd [10]. Про-

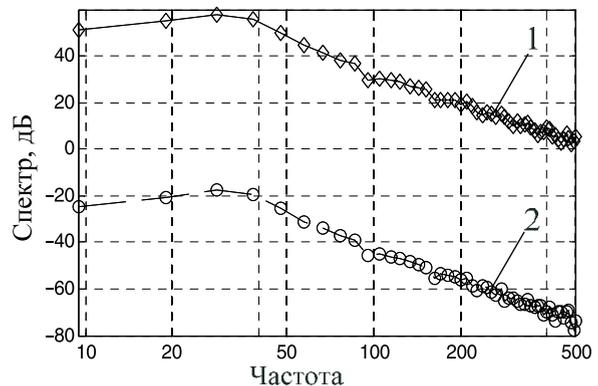


Рис. 3. Спектры сигналов с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2)

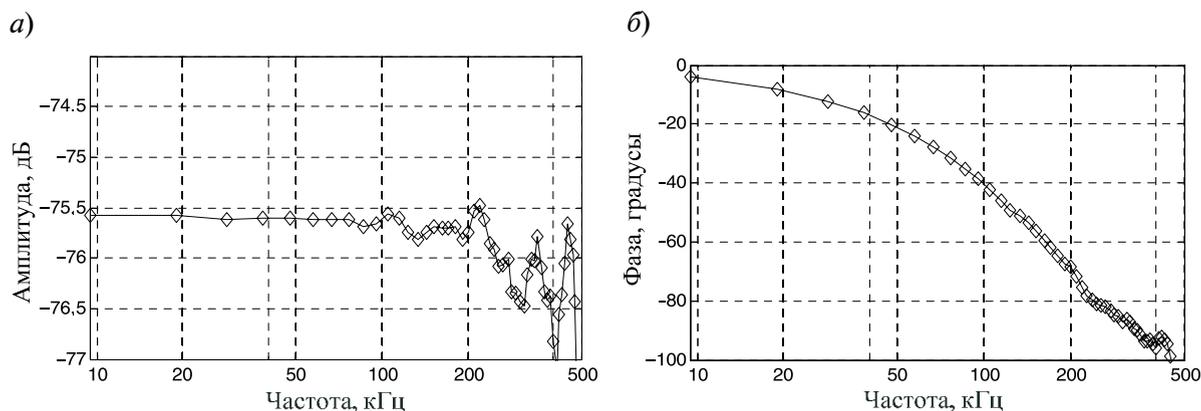


Рис. 4. Динамические характеристики шунта:

a – модуль коэффициента передачи шунта; *б* – аргумент коэффициента передачи шунта

изводителем заявлены следующие технические характеристики трансформатора: частотный диапазон по уровню минус 3 дБ 0,3 Гц–25 МГц, погрешность измерений тока $\pm 0,5\%$ пиковое значение тока 5 кА, входное сопротивление нагрузки трансформатора > 50 кОм.

Фиксация сигналов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа LeCroy WaveSurfer 62S.

На рис. 2 показаны типичные сигналы, получаемые с выхода опорного трансформатора тока (кривая 1) и с выхода тестируемого шунта (кривая 2). Для наглядности сигналы приведены к одному масштабу.

Видно, что амплитуда импульса тока, протекающего через шунт, достигает значения ~ 3 кА.

Далее, в соответствии с алгоритмом определены усредненные спектры сигналов с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2). Эти спектры приведены на рис. 3.

Из приведенных графиков видно, что

значение спектра сигнала с выхода шунта уменьшается с ростом частоты. Кроме того, видно, что в области верхних частот, начиная с 100 кГц, спектр сигнала искажен шумом квантования и собственными шумами электрических цепей.

Рис. 4 иллюстрирует применение предложенного алгоритма при обработке экспериментальных данных. Видно, что в диапазоне частот до 100 кГц коэффициент передачи шунта примерно равен $-75,5$ дБ.

В статье предложен и экспериментально исследован импульсный метод анализа динамических характеристик сильноточных токовых шунтов. Метод включает усреднение спектральных компонент сигналов по ансамблю, что позволяет повысить точность определения характеристик шунта. Дальнейшие исследования будут направлены на восстановление формы импульсного сигнала, включая снижение шума и уменьшение погрешности квантования как во временной, так и в частотной областях [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A computer system: measurement of welding surge currents // Measurement and control. –2009. –Vol. 42. –№ 3. –P. 44–47.
2. Muravyov S.V., Borikov V.N., Kaysanov S.A. Computer system for measurement of welding process parameters // Proc. of the XVIII IMEKO World Congress. Sept. 22–27, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
3. Metwally I.A. Coaxial-Cable Wound Rogows-

- ki Coils for Measuring Large-Magnitude Short-Duration Current Pulses // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. –2013. –Vol. 62. –№ 1. –P. 119–128.
4. Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M. Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts, Metrology in the 3rd Millennium // Proc. XVII IMEKO World Congress. June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia. –P. 586–589.
5. Schoukens J., Vandersteen G., Rolain Y., Pin-

telon R. Frequency response function measurements using concatenated subrecords with arbitrary length // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. –2012. –Vol. 61. –№ 10. –2682–8 p.

6. **Bendat J.S., Piersol A.G.** Engineering Applications of Correlations and Spectral Analysis. –Wiley, New York, 1980. –541 p.

7. **Zarevich A.I., Muravyov S.V., Bedareva E.V., Velychko O.M.** Digital processing of pulse signals for current transducers frequency response determination // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. –2012. –Vol. 320. –№ 5. –P. 116–120.

8. **Zarevich A., Muravyov S., Bedareva E.** Digital Signal Processing in Pulse Method for Measuring Frequency Response Function of High-Current

Shunt // 19th IMEKO TC 4 Symp. Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability. July 18–19, 2013, Barcelona, Spain. –P. 496–500.

9. **Ifeachor E., Jervis B.** Digital signal processing. A practical approach. –Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.

10. **Cordingley B., Chamund D.J.** Some observations on the performance of modern wideband current transformers in pulse current measurement applications // Proc. of 5th Modulator-Klystron Workshop for Future Linear Colliders CERN. 26–27 Apr. 2001, Geneva, Switzerland [электронный ресурс] / URL: <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf>

REFERENCES

1. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M.** A computer system: measurement of welding surge currents / Measurement and control. –2009. –Vol. 42. –№ 3. –P. 44–47.

2. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Kaysanov S.A.** Computer system for measurement of welding process parameters / Proc. of the XVIII IMEKO World Congress. Sept. 22–27, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

3. **Metwally I.A.** Coaxial-Cable Wound Rogowski Coils for Measuring Large-Magnitude Short-Duration Current Pulses / IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. –2013. –Vol. 62. –№ 1. –P. 119–128.

4. **Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M.** Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts, Metrology in the 3rd Millennium / Proc. XVII IMEKO World Congress. June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia. –P. 586–589.

5. **Schoukens J., Vandersteen G., Rolain Y., Pintelon R.** Frequency response function measurements using concatenated subrecords with arbitrary length / IEEE Transactions on instrumentation and measurement. –2012. –Vol. 61. –№ 10. –2682–8 p.

6. **Bendat J.S., Piersol A.G.** Engineering Ap-

plications of Correlations and Spectral Analysis. –Wiley, New York, 1980. –541 p.

7. **Zarevich A.I., Muravyov S.V., Bedareva E.V., Velychko O.M.** Digital processing of pulse signals for current transducers frequency response determination / Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. –2012. –Vol. 320. –№ 5. –P. 116–120. (rus)

8. **Zarevich A., Muravyov S., Bedareva E.** Digital Signal Processing in Pulse Method for Measuring Frequency Response Function of High-Current Shunt / 19th IMEKO TC 4 Symp. Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability. July 18–19, 2013, Barcelona, Spain. –P. 496–500.

9. **Ifeachor E., Jervis B.** Digital signal processing. A practical approach. –Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.

10. **Cordingley B., Chamund D.J.** Some observations on the performance of modern wideband current transformers in pulse current measurement applications / Proc. of 5th Modulator-Klystron Workshop for Future Linear Colliders CERN. 26–27 Apr. 2001, Geneva, Switzerland. Available <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf>

ЗАРЕВИЧ Антон Иванович – доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: antonzarevich@tpu.ru

ZAREVICH, Anton I. National Research Tomsk Polytechnic University.

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: antonzarevich@tpu.ru



Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

УДК 004.7

*Д.Ю. Райчук, А.В. Самочадин, Д.А. Тимофеев,
П.А. Рогов, Д.А. Иванченко*

КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМЫЕ МОБИЛЬНЫЕ СЕРВИСЫ ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ

*D.Yu. Raychuk, A.V. Samochadin, D.A. Timofeev,
P.A. Rogov, D.A. Ivanchenko.*

CONTEXT-AWARE SERVICES FOR EDUCATIONAL ORGANIZATIONS

Представлена архитектура решения для предоставления контекстно-зависимых сервисов для образовательных учреждений, базирующаяся на технологии централизованного управления мобильными устройствами. Предложен ряд контекстно-зависимых сервисов, который может быть реализован на основе рассмотренной архитектуры.

МОБИЛЬНЫЕ СЕРВИСЫ; MOBILE DEVICE MANAGEMENT; КОНТЕКСТНО-ЗАВИСИМЫЕ СЕРВИСЫ.

The paper presents the MDM-based architecture for providing context-aware services for educational organizations. A number of context-aware services are proposed that can be implemented on the basis of this architecture.

MOBILE SERVICES; MOBILE DEVICE MANAGEMENT; CONTEXT-AWARE SERVICES.

Современное образование предполагает высокую степень самостоятельной работы и самоорганизации студентов. Этому способствуют как структура учебных планов, в которых самостоятельной работе отводится значительное время, так и доступность образовательных ресурсов – публичных учебных курсов, семинаров, конференций, книг и документации. В результате возрастающее количество студентов планирует свою учебную и исследовательскую работу, не ограничиваясь рамками расписания занятий, нередко кооперируясь с другими студентами и, в некоторых случаях, с преподавателями. Для того чтобы такая работа была эффективной, необходимо предоставить студентам доступ к образовательным материалам и ресурсам с учетом их целей, уровня подготовки, формы работы и места занятий.

Еще одной особенностью современной университетской среды является широкое использование студентами и преподавателями мобильных устройств – смартфонов, планшетов, ноутбуков. Такие устройства способны подключаться к локальной и глобальной сетям и выступать в качестве клиентов широкого спектра сервисов. Несмотря на предоставляемые такими устройствами возможности, они довольно редко используются в учебном процессе. Мобильные устройства могут обеспечивать доступ к сервисам, обеспечивающим более активное взаимодействие студентов и преподавателей, в т. ч. во время интерактивных занятий, и предоставляющим студентам необходимые для самостоятельного обучения образовательные ресурсы. Проблемы, связанные с предоставлением мобильных

сервисов, активно обсуждаются как за рубежом [1, 2], так и в России [3–5].

С учетом в значительной степени самостоятельного планирования студентами своей учебной работы, академической мобильности, динамического формирования групп во время семинаров и публичных лекций, такие образовательные сервисы должны учитывать контекст, в котором они используются.

Контекст – «любая существенная информация, характеризующая ситуацию, в которой оказалась сущность. Под сущностью подразумевается человек, место или объект, считающийся важным для взаимодействия с пользователем приложения (конечным пользователем или же другими приложениями)» [6].

Контекст может включать в себя, в частности:

пространственное положение пользователей сервиса и доступные в этом месте технические средства (наличие компьютеров, проекторов, интерактивных досок);

состав группы, совместно использующей образовательный сервис;

уровень знаний студента в конкретной области, историю изученных курсов (разделов курса) или материалов, к которым студент обращался ранее;

ограничения конкретного вида занятий, такие, как запрет на использование учебных материалов во время контрольной работы.

Для учета контекста необходимо уметь идентифицировать пользователя сервиса и получать данные о его текущем состоянии, которые можно связать с хранимой на сервере информацией об образовательной среде и истории действий пользователя [7, 8]. Такая идентификация может быть выполнена с помощью мобильных устройств пользователя при условии подключения этих устройств к корпоративной системе централизованного управления мобильными устройствами (MDM) образовательного учреждения или его подразделения. Использование MDM позволяет обеспечить информационную безопасность, контроль и поддержку мобильных устройств, используемых пользователями.

В данной статье рассматривается архитектура системы, предоставляющей мобильные сервисы с учетом контекста, а также описывается набор сервисов, которые могут предоставляться с использованием такой системы.

Другой подход к решению этой задачи описан в [9]. Основной целью этой работы было создание простой в реализации инфраструктуры, способной без переконфигурирования поддерживать различные подходы к обучению (традиционные занятия с преподавателем, совместную самостоятельную работу студентов, эпизодические консультации). Предложенная авторами [9] инфраструктура ориентируется на мобильные устройства, однако использует их, прежде всего, в качестве терминалов. Отличием предлагаемого в данной работе подхода является использование мобильных устройств не только в качестве клиента образовательных сервисов, но и для извлечения информации о контексте использования этих сервисов.

Архитектура системы

С точки зрения предоставления сервисов в университете нас интересуют следующие сущности:

- человек (студенты, преподаватели, сотрудники университета);
- место (здания, аудитории, лаборатории, конференц-залы, кафе, библиотеки);
- объекты (приборы и лабораторное оборудование, принтеры, компьютеры, проекторы);
- информационные материалы (книги, материалы курсов, тексты заданий).

Каждая из этих сущностей характеризуется местоположением и состоянием. Местоположение определено для всех сущностей, кроме электронных информационных материалов, которые обычно доступны всюду, где пользователь имеет возможность обратиться к соответствующему сервису. Состояние определяется для каждого вида сущностей отдельно.

Человек характеризуется его актуальным состоянием и хранимой на сервере информацией о профиле и истории действий

этого человека в системе. С точки зрения образовательной деятельности под актуальным состоянием человека целесообразно понимать его занятость в определенный момент времени или готовность принять участие в определенной деятельности. Так, преподаватель может объявлять о готовности встретиться со студентами для консультаций или обсуждения текущих вопросов.

Профиль каждого участника образовательного процесса может включать специализацию, профессиональные и личные интересы, расписание занятий и учебные планы. История действий каждого человека включает как историю взаимодействия с системой (перечень материалов и сервисов, к которым обращался пользователь), так и историю участия пользователя в образовательном процессе (например, список изученных курсов и разделов курсов, которые изучил данный студент).

К свойствам места относятся его вид и назначение, занятость объекта или наличие свободных мест в таких местах общего пользования, как кафе или библиотеки, а также наличие в этом месте определенных объектов (техники, книг) или людей.

К свойствам объектов относятся их вид и назначение, перечень выполняемых функций, занятость или доступность объекта, сведения о режиме использования и доступности для конкретных людей или категорий пользователей.

Информационные материалы характеризуются сведениями об их авторстве, правах использования, связи между материалами и учебными курсами (областями знаний), к которым относятся материалы. Важным свойством информационных материалов является режим доступа к ним. Так, конспекты лекций могут быть всегда доступны всем пользователям, за исключением пользователей, которые в данный момент сдают экзамен по соответствующему предмету. Условия контрольных работ могут публиковаться одновременно для всех студентов, выполняющих эту работу, в начале занятия, и становиться недоступными после того, как занятие будет завершено.

Выбор архитектуры системы, предоставляющей сервисы с учетом контекста, зависит от набора данных, входящих в контекст, и от способа их получения. Предлагаемое решение включает в контекст как данные, получаемые от мобильного устройства пользователя (идентификатор пользователя, его местоположение), так и данные, которые централизованно хранятся в системе. Все сервисы используют общий интерфейс доступа к данным контекста.

Таким условиям соответствует архитектура построения сервисов с учетом контекста, предложенная в работе [10]. Эта архитектура включает ряд служб, называемых поставщиками контекста, часть из которых ассоциирована с пользователем сервиса, а остальные являются частью системы предоставления сервисов. Данные всех поставщиков контекста обрабатываются модулем анализа контекста, общим для всех предоставляемых сервисов.

Предлагаемое решение расширяет эту архитектуру путем включения в нее инфраструктуры MDM. Такая модификация дает ряд новых возможностей.

1. Сервер MDM взаимодействует со всеми зарегистрированными мобильными устройствами, обеспечивая их идентификацию, ассоциируя устройства с пользователями корпоративной сети и предоставляя единый интерфейс для получения данных о местоположении и динамическом состоянии пользователей. При использовании MDM существенно упрощается устройство модуля анализа контекста, поскольку за его рамки выносятся все вопросы взаимодействия с разнообразными мобильными устройствами.

2. Использование MDM позволяет не только получать данные о мобильных устройствах, но и управлять их поведением: инициировать передачу данных на устройство, включать и отключать определенные сервисы (нотификацию, передачу данных), асинхронно запрашивать состояние устройства.

3. При использовании MDM в контекст включаются не только данные о пользователе сервиса, но и данные о других пользо-

вателей, которые находятся рядом с пользователем сервиса или могут быть связаны с ним иным образом.

Архитектура предлагаемого решения приведена на рисунке. Каждый пользователь системы идентифицируется с помощью MDM. Сервер MDM также обеспечивает определение положения пользователей в пространстве, используя как данные мобильных устройств, так и данные, получаемые с помощью других компонентов инфраструктуры (беспроводные сети, стационарное оборудование, электронные замки). На основе данных о местоположении и сведений, содержащихся в базе данных объектов, формируется пространственный контекст пользователя. Пространственный контекст позволяет учесть, в каком помещении находится пользователь, какие ресурсы доступны в этом или соседних помещениях, какие ограничения накладываются на использование ресурсов и сервисов и какие пользователи находятся рядом. На основе

идентификатора пользователя формируется контекст взаимодействия пользователя с системой, в основу которого ложится история предшествующих обращений к сервисам. Благодаря идентификации пользователей в системе MDM, в контекст запроса включаются контексты других пользователей, например, соседей по помещению или студентов, слушающих тот же самый учебный курс.

Выполняя запрос, сервис может обращаться к собранным данным о контексте, используя стандартный интерфейс. При этом возможно дополнение контекста, например, путем получения дополнительной информации о других пользователях.

Использование контекстной информации о пользователях системы не влечет за собой нарушения их приватности. Вся используемая информация может быть разделена на две категории: публично доступные сведения (расписание занятий, расписание экзаменов, планы зданий) и сведения, ко-



Архитектура системы

торые пользователь самостоятельно соглашается предоставить. Решение о предоставлении сведений о состоянии пользователя может быть принято однократно (на основе корпоративной политики), при регистрации мобильных устройств пользователя в системе или, при необходимости, приниматься непосредственно при публикации данных (например, пользователь может сообщать о своем местоположении во время определенных мероприятий, но запретить использование этой информации в остальное время).

Выполнив запрос, сервис формирует ответы двух видов.

1. Ответ на запрос пользователя, который направляется на то устройство, с помощью которого пользователь выполнил запрос.

2. Набор команд управления мобильными устройствами, который направляется серверу MDM. Таким образом сервис может инициировать передачу данных на мобильные устройства пользователей или изменить режимы их работы. Возможные действия сервиса ограничиваются настройками сервера MDM.

Предоставляемые сервисы

Для выделения сервисов, используемых в образовательных учреждениях, был проведен анализ и классификация услуг [5], используемых в ряде ведущих университетов мира (Массачусетский технологический институт, Стэнфордский университет, Гарвардский университет, МГИМО и др.). Предложенная архитектура позволяет реализовать все типы имеющихся услуг и провести их функциональное расширение на основе контекста, получаемого от использования системы MDM. На основе описанной архитектуры возможна реализация сервисов следующих типов:

- справочные сервисы;
- информационные сервисы;
- регистрационные сервисы;
- сервисы доступа к объектам;
- коммуникационные сервисы.

Справочные сервисы. Справочные сервисы предоставляют справочную инфор-

мацию о деятельности образовательного учреждения. В отличие от стандартных справочников, сервисы расширяются на основе контекстной информации о занятости людей и мест.

Телефонный справочник. Кроме традиционной справочной информации (телефон, e-mail, расположение офиса) содержит оперативную информацию о занятости абонента. Информация о занятости формируется с учетом расписания занятий, расписания плановых мероприятий, в которых должен принимать участие абонент (с возможной проверкой реального участия по его местоположению) и с учетом внеплановых для абонента мероприятий, участие в которых определяется, исходя из местоположения абонента и оперативного статуса места, в котором он находится (например, это аудитория, которая занята для проведения со-вещания).

Справочник контактной информации об официальных службах (департаменты управления отделы) кроме традиционной информации содержит оперативную информацию, основанную на расписании работы соответствующей службы и с учетом различных мероприятий (совещания, ремонт и т. д.)

Справочник аудиторий содержит оперативную информацию о занятости аудиторий, которая формируется как на основе различных расписаний, так и с учетом оперативной информации о людях, которые находятся в аудитории.

Справочник мест общественного питания содержит информацию о расписании работы и сведения о количестве людей, находящихся там в момент запроса информации.

Справочная информация о маршрутах по кампусу с учетом информации о различных видах ограничений: ремонты, проведение мероприятий, затрудняющих проход, пробки.

Справочная информация о времени ожидания транспорта.

Справочник парковок содержит информацию о загрузке парковок.

Справочник событий содержит информацию о каждом событии, о месте и времени его проведения. Пользователи имеют

возможность добавлять свою информацию, например, о различных происшествиях на территории вуза, о местах проведения внеплановых мероприятий.

Информационные сервисы. Информационные сервисы обеспечивают доступ пользователей к учебным материалам и другим видам информационных ресурсов. Традиционные сервисы расширяются на основе контекстной информации о времени их использования и местоположения пользователей.

Доступ к информационным и образовательным ресурсам (аудио- и видеокурсам, презентациям), вебинарам, учебным приложениям в соответствии с расписанием, определенным преподавателем.

Доступ к учебным, методическим и справочным материалам в соответствии с расписанием, определенным преподавателем.

Доступ к контрольным материалам в соответствии с расписанием, определенным преподавателем.

Автоматическая загрузка на устройство пользователя информационных материалов, документов и текстовых сообщений на основе реального местоположения пользователя.

Автоматизированное безопасное удаление из мобильного устройства корпоративной информации («безопасное затираание»).

Регистрационные сервисы. Регистрационные сервисы обеспечивают регистрацию участников на различные мероприятия. Они расширяются путем учета контекстной информации о планах проведения этих мероприятий.

Регистрация на курсы (семинары, открытые лекции, факультативы и др.) в соответствии с планом проведения.

Регистрация на экзамены, онлайн-тесты в соответствии с расписанием.

Регистрация на занятиях и мероприятиях на основе реального местоположения.

Автоматическое определение списка лиц, присутствующих на мероприятии (лекции, семинаре, совещании и т. д.) на основе ре-

ального местоположения участников.

Сервисы доступа к объектам. *Онлайн-заказ книг* с учетом их занятости и возможности обращения через библиотеку к читателям, у которых находится нужная книга.

Доступ к оборудованию (сервисы, основанные на возможностях доступа к различным устройствам корпоративной сети).

Беспроводное подключение к различным устройствам (принтерам, проекторам, к различным мультимедийным устройствам) на основе реального местоположения пользователя.

Беспроводное подключение к измерительным приборам, сенсорам и лабораторному оборудованию в образовательных и исследовательских целях (на основе реального местоположения пользователя).

Автоматизированная блокировка и разблокировка сенсоров мобильных устройств в соответствии с проводимыми образовательными мероприятиями (на основе местоположения, расписания).

Коммуникационные сервисы. *Социальные сети* с возможностью получения информации о местоположении участников. Пользователи могут объединяться в виртуальные группы и видеть на своих мобильных устройствах местоположение участников этих групп.

Массовое оповещение, информирование пользователей с учетом их реального местоположения.

В статье предложена архитектура решения для предоставления контекстно-зависимых сервисов для образовательных учреждений, базирующаяся на технологии централизованного управления мобильными устройствами. Предложен ряд контекстно-зависимых сервисов, который может быть реализован на основе предложенной архитектуры.

Разработка ПО для систем централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках совместного проекта компании IBS (Москва) и СПбГПУ (Санкт-Петербург). Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alzaza Naji Shukri, Abdul Razak Yaakub.** Students' awareness and requirements of mobile learning services in the higher education environment // American J. of Economics and Business Administration 3.1 (2011): 95. Academic OneFile, 13 Oct. 2013. – P. 95–100.

2. **Mtega W.P., Bernard R., Msungu A.C., Sanare R.** Using Mobile Phones for Teaching and Learning Purposes in Higher Learning Institutions: the Case of Sokoine University of Agriculture in Tanzania // Proc. and report of the 5th UbuntuNet Alliance Annual Conf. –2012. –P. 118–129.

3. **Титова С.В.** Мобильное обучение сегодня: стратегии и перспективы // Вестник МГУ. – 2012. –Сер. 19.

4. **Голицына И.Н., Половникова Н.Л.** Мобильное обучение как новая технология в образовании [электронный ресурс] // Образовательные технологии и общество. – 2011. – Vol. 14. –№ 1. – С. 241–252.

5. **Иванченко Д.А., Хмельков И.А., Райчук Д.Ю., Митрофанов А.М., Самочадин А.В., Rogov П.А.** Применение подходов BYOD для построения стратегии информатизации высшего

учебного заведения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. –№ 3(174). –С. 85–92.

6. **Dey K.** Understanding and Using Context, Personal Ubiquitous Computing. – Jan. 2001. –Vol. 5.

7. **Truong H.L., Dustdar S.** A survey on context-aware web service systems // Internat. J. of Web Information Systems. –2009. –Vol. 5. –Iss. 1. –P.5 – 31.

8. **Ciaramella Alessandro, Cimino Mario G.C.A., Lazzarini Beatrice, Marcelloni Francesco.** Situation-Aware Mobile Service Recommendation with Fuzzy Logic and Semantic Web // Proc. of the 2009 Ninth Internat. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications. – Nov. 30–Dec. 02, 2009. – P. 1037–1042.

9. **Scott K., Benlamri R.** Context-Aware Services for Smart Learning Spaces // IEEE Transactions on learning technologies. – July-Sept. 2010. – Vol. 3. –№ 3.

10. **Jones K.** Building a context-aware service architecture. –IBM developerWorks, 2008

REFERENCES

1. **Alzaza Naji Shukri, Abdul Razak Yaakub.** Students' awareness and requirements of mobile learning services in the higher education environment / American J. of Economics and Business Administration 3.1 (2011): 95. Academic OneFile, 13 Oct. 2013. – P. 95–100.

2. **Mtega W.P., Bernard R., Msungu A.C., Sanare R.** Using Mobile Phones for Teaching and Learning Purposes in Higher Learning Institutions: the Case of Sokoine University of Agriculture in Tanzania / Proc. and report of the 5th UbuntuNet Alliance annual conference. –2012. – P. 118–129.

3. **Titova S.V.** Mobilnoye obucheniye segodnya: strategii i perspektivy / Vestnik MGU. – 2012. Ser. 19. (rus)

4. **Golitsyna I.N., Polovnikova N.L.** Mobilnoye obucheniye kak novaya tekhnologiya v obrazovanii / Mezhdunar. elektr. zhurnal Obrazovatelnyye tekhnologii i obshchestvo. – 2011. – Vol. 14. – № 1. – S. 241–252. (rus)

5. **Ivanchenko D.A., Khmelkov I.A., Raychuk D.Yu., Mitrofanov A.M., Samochadin A.V., Rogov P.A.** Primeneniye podkhodov BYOD dlya postroyeniya strategii informatizatsii

vysshego uchebnogo zavedeniya / Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. –St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – № 3(174). –S. 85–92. (rus)

6. **Dey K.** Understanding and Using Context, Personal Ubiquitous Computing, Jan. 2001. – Vol. 5.

7. **Truong H.L., Dustdar S.** A survey on context-aware web service systems / Internat. J. of Web Information Systems. – 2009. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 5–31.

8. **Ciaramella Alessandro, Cimino G.C.A. Mario, Lazzarini Beatrice, Marcelloni Francesco.** Situation-Aware Mobile Service Recommendation with Fuzzy Logic and Semantic Web / Proc. of the 2009 Ninth Internat. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications, Nov. 30–Dec. 02, 2009. – P. 1037–1042.

9. **Scott K., Benlamri R.** Context-Aware Services for Smart Learning Spaces / IEEE Transactions on learning technologies, July-Sept. 2010. – Vol. 3. –№ 3.

10. **Jones K.** Building a context-aware service architecture / IBM developerWorks, 2008.

РАЙЧУК Дмитрий Юрьевич – проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

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

E-mail: vicerector.sc@spbstu.ru

RAYCHUK, Dmitry Yu. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: vicerector.sc@spbstu.ru

САМОЧАДИН Александр Викторович – профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: samochadin@dcn.icc.spbstu.ru

SAMOCHADIN, Aleksandr V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: samochadin@dcn.icc.spbstu.ru

ТИМОФЕЕВ Дмитрий Андреевич – старший преподаватель кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

TI MOFEEV, Dmitry A. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: dtim@dcn.icc.spbstu.ru

РОГОВ Петр Александрович – заместитель начальника организационного отдела департамента научно-организационной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

ROGOV, Petr A. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

ИВАНЧЕНКО Дмитрий Алексеевич – ведущий консультант *IBS.*
127434, Россия, Москва, Дмитровское ш., д. 9Б.
E-mail: DIvanchenko@ibs.ru

IVANCHENKO, Dmitry A. *IBS.*
127434, Dmitrovskoe Sh. 9B, Moscow, Russia.
E-mail: DIvanchenko@ibs.ru

УДК 536.421

Е.Д. Екатеринчук, Т.В. Рязанова, Л.Б. Ряшко

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ШУМОМ ПЕРЕХОДЫ В МОДЕЛИ БИЗНЕС-ЦИКЛОВ ГУДВИНА

E.D. Ekaterinchuk, T.V. Ryazanova, L.B. Ryashko

NOISE-INDUCED TRANSITIONS FOR BUSINESS CYCLES GOODWIN MODEL

Рассмотрена модель экономической динамики Гудвина, находящаяся под воздействием случайных возмущений. Исследованы вероятностные свойства аттракторов стохастической системы с использованием техники функций стохастической чувствительности и метода прямого численного моделирования. Опираясь на данную методику, построены доверительные области (эллипсы и полосу). Найдены критические интенсивности вносимого шума, при которых происходят переходы из бассейна притяжения одного аттрактора в бассейн другого.

МОДЕЛЬ ГУДВИНА; БИЗНЕС-ЦИКЛЫ; СЛУЧАЙНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ; ФУНКЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ; ИНДУЦИРОВАННЫЕ ШУМОМ ПЕРЕХОДЫ; ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ.

The Goodwin economic dynamical model under random disturbances is considered. We study probabilistic properties of stochastic attractors numerically and theoretically via stochastic sensitivity functions technique. Confidence domains are constructed on the base of this method. We have found critical values of the noise intensity corresponding to the noise-induced transitions between basins of attractors.

GOODWIN MODEL; BUSINESS CYCLES; RANDOM DISTRIBUTIONS; STOCHASTIC SENSITIVITY FUNCTION; NOISE-INDUCED TRANSITIONS; CONFIDENT DOMAINS.

Рассматривается модель экономической динамики Гудвина [1] — модель нелинейного акселератора-мультипликатора, которая может быть записана в виде:

$$\zeta\theta\ddot{x}(t) + (\zeta + (1-a)\theta)\dot{x}(t) - \varphi(\dot{x}(t)) + (1-a)x(t) = O^*(t),$$

где x — доход; a — предельный уровень потребления; ζ — константа, представляющая запаздывание в динамике коэффициента развития; θ — запаздывание между решением об инвестировании и соответствующими расходами; $\varphi(\dot{x})$ — инвестиции, индуцированные изменениями дохода; $O^*(t)$ — размер независимых издержек по времени. Обобщенная форма этого уравнения дана Лоренцем [2]:

$$\ddot{x}(t) + A(x(t))\dot{x}(t) + B(x(t)) = O^*(t),$$

здесь x — отклонение дохода от равновесия; $A(x)$ — четная функция с условиями $A(0) < 0$; $A''(0) > 0$; $B(x)$ — нечетная функция с условием $B(0) = 0$; $O^*(t)$ — функция издержек.

В своих исследованиях Лоренц и Нуссэ [3] предложили конкретный вид функций $A(x)$ и $B(x)$:

$$\ddot{x} + a \frac{x^2 - 1}{x^2 + 1} \dot{x} - bx + cx^3 = O^*,$$

Функцию $O^*(t)$ можно трактовать как некоторое внешнее воздействие. Если $O^*(t)$ — периодическая функция, то модель демонстрирует переходы от регулярных ко-

лебаний к хаотическим. Различные модификации модели Гудвина исследованы в ряде работ (например [4–7]). Несомненный интерес представляет анализ модели, когда $O^*(t)$ является случайной функцией.

В данной статье рассматривается стохастическая модель экономической динамики Гудвина, задаваемая дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{x} + a \frac{x^2 - 1}{x^2 + 1} \dot{x} - bx + cx^3 = \varepsilon \dot{\omega}, \quad (1)$$

где $a > 0, b > 0, c > 0$; ω – стандартный винеровский процесс; ε – интенсивность шума.

Детерминированные аттракторы модели Гудвина

Запишем детерминированную модель Гудвина (1) ($\varepsilon = 0$) в виде системы:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -a \frac{x^2 - 1}{x^2 + 1} y + bx - cx^3. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) существуют три равновесия $M_0(0, 0), M_1\left(\sqrt{\frac{b}{c}}, 0\right), M_2\left(-\sqrt{\frac{b}{c}}, 0\right)$.

Они лежат на оси Ox и имеют абсциссы, не зависящие от параметра a . Равновесия M_1, M_2 симметричны относительно M_0 .

Проведенный анализ показывает, что равновесие M_0 при любых значениях пара-

метров является седлом. Это означает, что взятое за точку отсчета нулевое положение переменной дохода всегда неустойчиво. Локальные фазовые портреты равновесий M_1, M_2 имеют один тип. Их параметрическое описание представлено в сводной бифуркационной диаграмме (рис. 1).

Здесь для $a = 2$ представлены следующие зоны: А – устойчивый узел; $B \cup C \cup D$ – устойчивый фокус; Е – неустойчивый фокус; F – неустойчивый узел. Три границы, разделяющие зоны, имеют следующие аналитические представления:

$$\psi_1(a, b) = \frac{b}{a^2 - 8b}(a^2 + 8b - 4a\sqrt{2b}),$$

$$\psi_4(a, b) = b,$$

$$\psi_5(a, b) = \frac{b}{a^2 - 8b}(a^2 + 8b + 4a\sqrt{2b}).$$

Граница $c = \psi_2(a, b)$ (пунктирная линия) соответствует бифуркационной кривой, отвечающей жесткому рождению полуустойчивого цикла. При увеличении параметра c полуустойчивый цикл распадается на два цикла: устойчивый и неустойчивый. Граница $c = \psi_3(a, b)$ соответствует разделению одного неустойчивого цикла на два, ограничивающие бассейны притяжения устойчивых равновесий M_1, M_2 . Кривые $\psi_2(a, b)$ и $\psi_3(a, b)$, не имеющие аналитического представления, были найдены численными методами. Таким образом, зоны С и D представляют наибольший интерес для изучения, как зоны параметров одновременного сосуществования устойчивых равновесий и цикла.

На рис. 2 а представлены поведения детерминированной системы в момент рождения полуустойчивого цикла ($c = 0,155332$), здесь жирной сплошной линией изображен полуустойчивый цикл, тонкими сплошными – траектории системы. Как видно, траектории, выпущенные извне цикла, наматываются на него, тогда как выпущенные внутри цикла – на одно из равновесий. На рис. 2 б представлено характерное поведение системы в зоне D (при $c = 0,18$). Здесь жирной сплошной линией изображен устойчивый цикл, пунктиром – два неустойчивых цикла, тонкими сплошными – фазовые траектории. Нетрудно заметить,

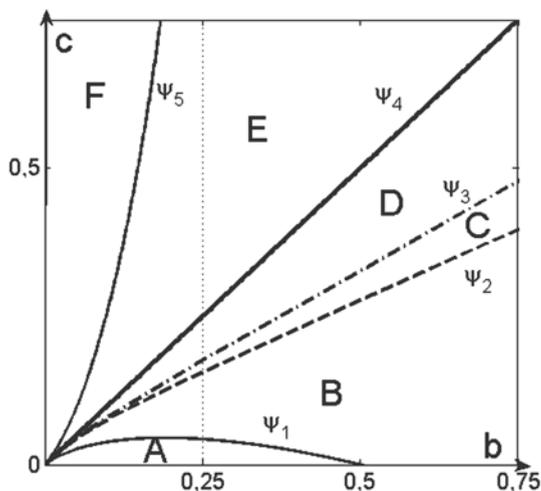


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма при $a = 2$

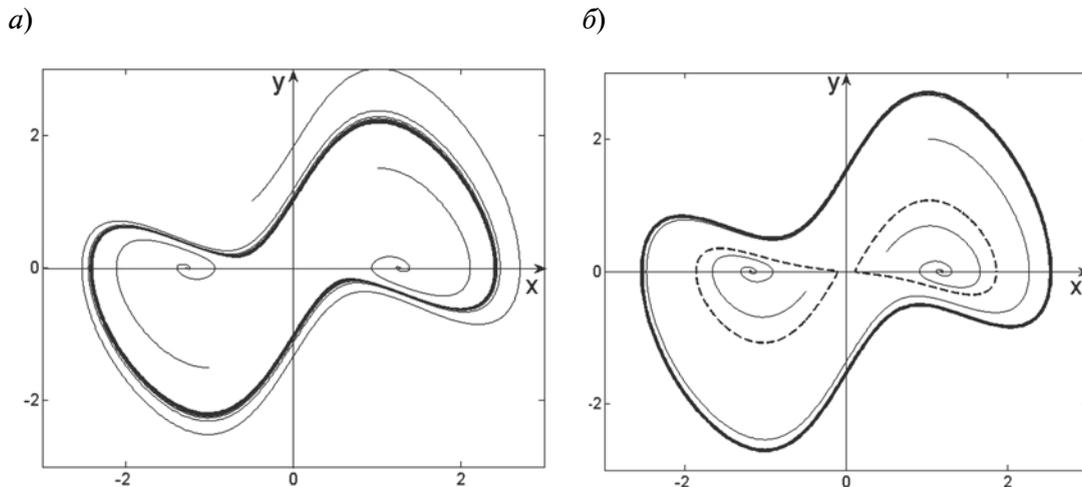


Рис. 2. Фазовые траектории для $a = 2, b = 0,25$:
 а – при $c = 0,155332$; б – при $c = 0,18$

что неустойчивые циклы разграничивают бассейны притяжения устойчивых равновесий и устойчивого цикла. Более подробный анализ детерминированной динамики можно найти в работе [8].

Чувствительность стохастических аттракторов

Функционирование любой экономической системы всегда сопровождается случайными возмущениями как внешними (аддитивными), так и внутренними (параметрическими). Присутствие случайного фактора приводит к деформации режимов динамического поведения исходной детерминированной модели. Анализ влияния случайных возмущений на динамику системы проводится с помощью аппарата функции стохастической чувствительности.

Функция стохастической чувствительности. В результате действия шумов случайные траектории системы покидают детерминированный аттрактор и формируют некоторый стохастический аттрактор со стационарным распределением $\rho(x, \varepsilon)$. Функция $\rho(x, \varepsilon)$ удовлетворяет стационарному уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК). Непосредственное использование этого уравнения уже для двумерных систем является технически трудной задачей. В этих обстоятельствах широко используются методики, основанные на функции квази-

потенциала $v(x) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^2 \ln \rho(x, \varepsilon)$.

Квазипотенциал [9] связан с некоторой вариационной задачей минимизации функционала действия и удовлетворяет уравнению Гамильтона–Якоби. Уравнение Гамильтона–Якоби выглядит проще, чем стационарное уравнение, однако и его точное решение является весьма сложной задачей. В работах Л.Б. Ряшко, И.А. Башкирцевой [10] предложен конструктивный подход, связанный с введением еще одной асимптотики в малой окрестности исследуемого аттрактора.

Доказано, что положительно определенная матрица W – матрица стохастической чувствительности – является решением алгебраического уравнения $FW + WF^T = -S$, где $F = \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}), S = GG^T, G = \sigma(\bar{x})$.

Эта матрица характеризует разброс случайных траекторий системы вокруг равновесия \bar{x} .

В случае цикла на плоскости матрицы $W(t)$ и $P(t)$ имеют ранг, равный единице, и представимы в виде

$$W(t) = m(t)P(t), P(t) = p(t)p^T(t).$$

Здесь $p(t)$ – нормированный вектор, ортогональный касательному вектору $f(\xi(t))$, а $m(t) > 0$ – T-периодическая скалярная функция, задающая разброс (дисперсию)

пучка по нормали к циклу. Функция $m(t)$ удовлетворяет краевой задаче

$$\begin{cases} \dot{m} = a(t)m + b(t) \\ m(0) = m(T) \end{cases}$$

с T -периодическими коэффициентами

$$\begin{aligned} a(t) &= p^T(t)(F^T(t) + F(t))p(t), \\ b(t) &= p^T(t)S(t)p(t). \end{aligned}$$

Функция $m(t)$ определяет локальную стохастическую чувствительность цикла в точке $\xi(t)$. Удобной характеристикой стохастического цикла в целом является коэффициент стохастической чувствительности $M = \max m(t)$, где $0 < t < T$.

Для изучения влияния случайных возмущений на динамику модели Гудвина перейдем к стохастической системе:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -a \frac{x^2 - 1}{x^2 + 1} y + bx - cx^3 + \varepsilon \omega, \end{cases} \quad (3)$$

где ω – стандартный винеровский процесс, моделирующий случайные внешние воздействия; ε – интенсивность шума.

Траектории системы под действием случайных возмущений покидают детерминированный аттрактор (равновесия или цикл) и формируют вокруг него некоторый пучок. При увеличении интенсивности шума разброс случайных состояний вокруг детерминированного аттрактора увеличивается.

Для стохастических равновесий модели (3) матрица стохастической чувствительности имеет диагональный вид:

$$W = \begin{pmatrix} \frac{c+b}{4ab(b-c)} & 0 \\ 0 & \frac{c+b}{2a(b-c)} \end{pmatrix}.$$

На интервале сосуществования равновесий M_1, M_2 и цикла, зависимость диагональных элементов w_{11} и w_{22} матрицы W от параметра c представлена на рис. 3 (сплошные линии). Как видно, стохастическая чувствительность равновесий при приближении параметра c к бифуркационному значению $c_2 = 0,25$ монотонно возрастает и стремится к бесконечности. Также на рисунке представлен график зависимости коэффициента стохастической чувствительности M от параметра c (пунктир). Аналогично случаю стохастического равновесия здесь наблюдается неограниченный рост стохастической чувствительности при стремлении параметра c к значению c_1 справа. При увеличении параметра c коэффициент чувствительности M монотонно стремится к нулю, что свидетельствует об уменьшении стохастической чувствительности цикла.

В зоне $c_1 < c < c_2$ в системе сосуществуют стохастические равновесия и стохастический цикл, при этом для c_1^* чувствительность стохастического цикла больше чувствительности равновесия, что влечет

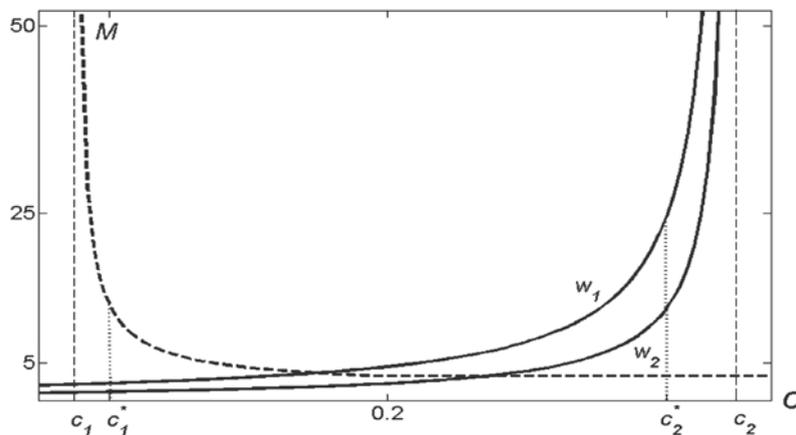


Рис. 3. Коэффициент стохастической чувствительности для цикла (-----) и для равновесия (—) при $a = 2, b = 0,25$

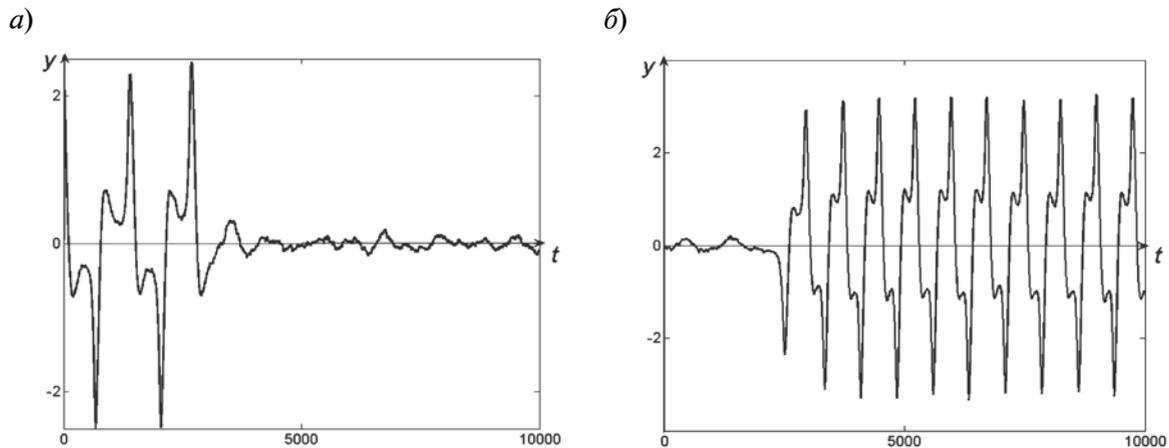


Рис. 4. Стохастическая траектория по времени переменной y при $a = 2, b = 0,25, \varepsilon = 0,05$:
 a – при $c = 0,16$; b – при $c = 0,24$

скорый переход из бассейна притяжения цикла на равновесие. При c_2^* наблюдается обратная картина перехода от стохастического равновесия на цикл. Данные переходы продемонстрированы на рис. 4 соответственно.

Индукцированные шумом переходы

Опираясь на метод функции стохастической чувствительности вокруг детерминированных аттракторов можно построить области, в которые с заданной вероятностью будут попадать стохастические состояния. Для равновесия данной областью является эллипс [11], для цикла – полоса [12]. С заранее заданной вероятностью случайные состояния будут распределены внутри этой области.

Построение доверительных областей. Для построения эллипсов рассеивания используются следующие формулы:

$$x = \bar{x} + \frac{z_1 v_{22} - z_2 v_{12}}{\Delta},$$

$$y = \bar{y} + \frac{z_2 v_{11} - z_1 v_{21}}{\Delta},$$

где $z_1(\varphi) = \sqrt{2\lambda_1} \varepsilon k \cos \varphi$, $z_2(\varphi) = \sqrt{2\lambda_2} \varepsilon k \sin \varphi$, $k^2 = -\ln(1 - P)$; Δ – определитель матрицы, составленной из собственных векторов матрицы W .

Доверительные полосы строятся по следующим формулам:

$$x_{1,2} = \xi(t) \pm k\varepsilon\sqrt{2\mu(t)}p(t),$$

где $k = \text{erf}^{-1}(P)$, $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$.

На рис. 5 *a* представлены стохастические состояния (точки), сепаратриса (пунктир) и эллипс рассеивания (сплошная) с доверительной вероятностью $p = 0,95$. В случае равновесия форма эллипса зависит от собственных чисел и векторов матрицы стохастической чувствительности W . Собственные векторы задают направления осей эллипса, а собственные значения их величину. Если собственные числа совпадают, то доверительной областью является окружность. Это значит, что отклонения случайных состояний от детерминированного равновесия будут равновелики как по оси Ox , так и по оси Oy . В случае, когда собственные значения разные, эллипс вытягивается больше вдоль собственного вектора, соответствующего большему собственному значению.

На рис. 5 *b* изображены стохастические состояния (точки), сепаратриса (пунктир) и доверительная полоса (сплошная) с вероятностью $p = 0,95$. Ширина полосы зависит от интенсивности вносимого шума и неравномерна вдоль цикла. Участки цикла более или менее чувствительные к вносимому шуму, распознаются функцией стохастической чувствительности и, как следствие, полоса на этих участках шире или уже.

Рассмотрим зону D параметров (см. рис. 1), где детерминированная система

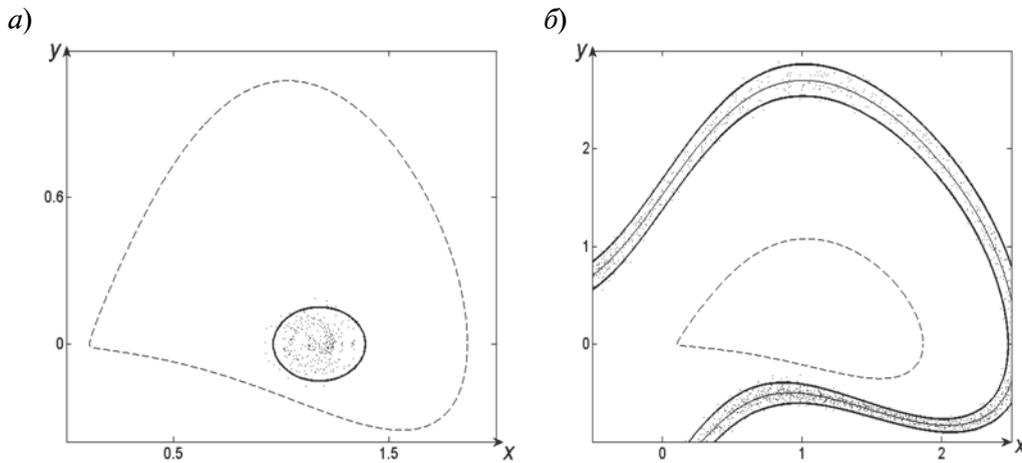


Рис. 5. Стохастические состояния ($\cdot\cdot\cdot$), сепаратриса (-----) и эллипс рассеивания (—) при $a = 2, b = 0,25, c = 0,18$:
 a — для $\varepsilon = 0,05$; b — для $\varepsilon = 0,04$

имеет два устойчивых равновесия и устойчивый цикл. Индуцированные шумом переходы в системе возникают в том случае, когда случайное состояние «выпрыгивает» из бассейна притяжения одного аттрактора в другой.

При достаточно малой интенсивности вносимого шума (рис. 5 *a*) границы доверительного эллипса удалены от сепаратрисы, следовательно, с заданной вероятностью можно утверждать, что переходы между бассейнами притяжения равновесия и цикла наблюдаться не будут. Аналогичная картина наблюдается для доверитель-

ной полосы предельного цикла (рис. 5 *б*). Увеличение интенсивности случайного возмущения влечет увеличение облака рассеивания вокруг детерминированного аттрактора, что демонстрируется увеличением доверительных областей (эллипса и полосы). В момент, когда доверительная область едва касается сепаратрисы, возникают переходы случайных состояний из бассейна одного аттрактора в бассейн другого. На рис. 6 представлены возникающие переходы для обеих ситуаций: с равновесия на цикл (рис. 6 *a*) и с цикла на равновесие (рис. 6 *б*).

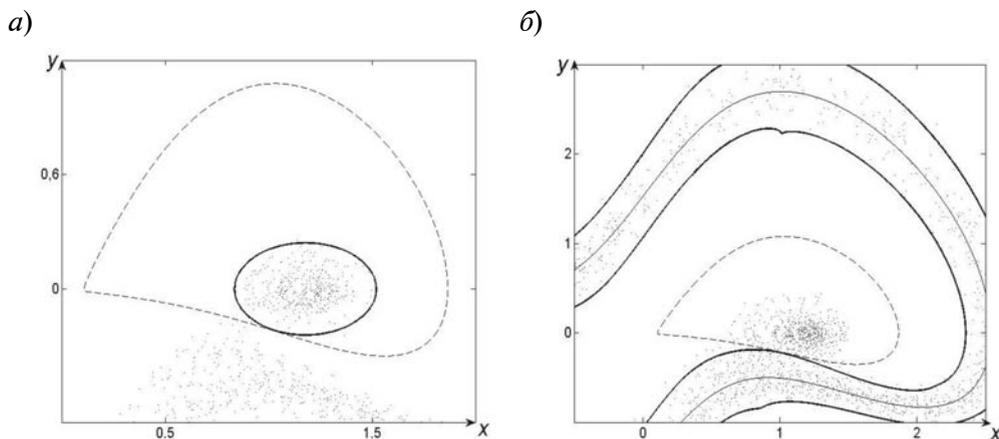


Рис. 6. Стохастические состояния ($\cdot\cdot\cdot$), сепаратриса седла (- - -) и доверительная полоса (—) при $a = 2, b = 0,25, c = 0,18$:
 a — для $\varepsilon = 0,08$; b — для $\varepsilon = 0,115$

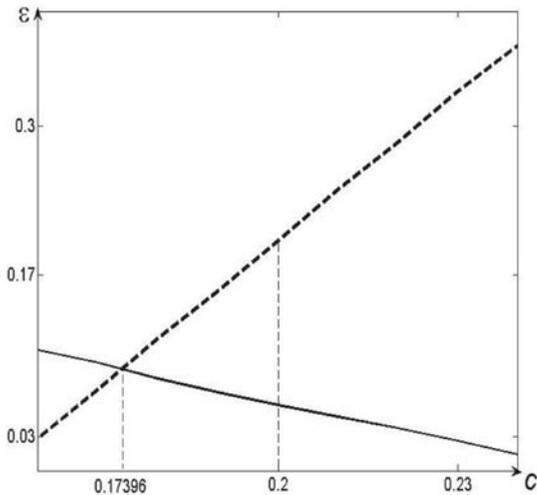


Рис. 7. Зависимость критической интенсивности аддитивного шума от параметра c при $a = 2, b = 0,25$

С помощью представленной аналитической методики можно находить критические значения интенсивности шума, начиная с которого в системе наблюдаются переходы между бассейнами притяжения аттракторов. На рис. 7 представлены зависимости критической интенсивности аддитивного шума от параметра c для переходов типа «равновесие-цикл» и «цикл-равновесие».

При увеличении параметра c значение критической интенсивности для переходов типа «равновесие-цикл» уменьшается (сплошная линия на рис. 7), в то время как для переходов типа «цикл-

равновесие» наблюдается обратная зависимость (пунктир). Подобное поведение легко объяснить, наблюдая за изменением чувствительности в зависимости от параметра c (см. рис. 3). Увеличение параметра c влечет увеличение чувствительности равновесия, следовательно, при меньшей интенсивности шума будут наблюдаться отклонения, достаточные, чтобы случайное состояние попало в бассейн притяжения другого аттрактора. В свою очередь чувствительность цикла при увеличении параметра c уменьшается, следовательно, для реализации переходов между аттракторами необходимо случайное воздействие большей интенсивности.

Зафиксируем значение параметра $c = 0,2$, при этом значения критических интенсивностей значительно отличаются друг от друга. При фиксированном меньшем значении критической интенсивности возможны переходы только одного типа «равновесие-цикл». На рис. 8 а представлены доверительные эллипс и полоса. Как видим, эллипс касается сепаратрисы, в то время как полоса значительно удалена. Для значения параметра $c = 0,17396$ значения критических интенсивностей совпадают. Это должно сопровождаться одновременным касанием доверительного эллипса и сепаратрисы с одной стороны, доверительной полосы и сепаратрисы – с другой (рис. 8 б). В данном случае случайные состояния системы

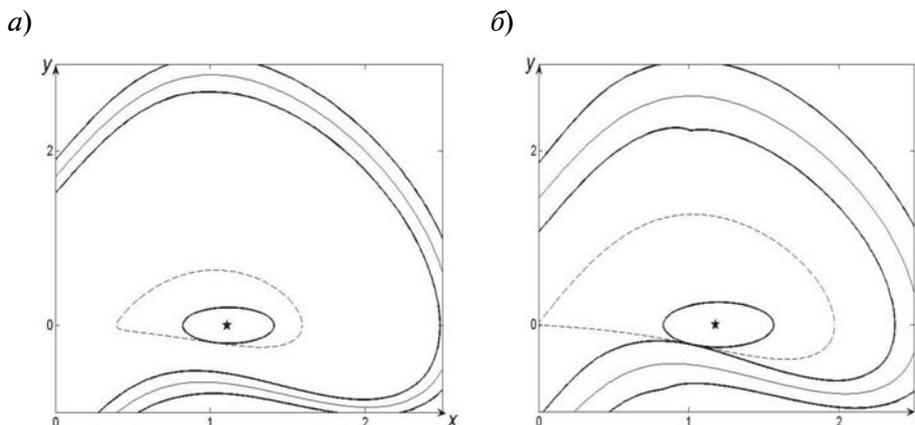


Рис. 8. Доверительные области (—), сепаратриса (- - -), цикл (—) и равновесия (*) при $a = 2, b = 0,25$:
 а – для $c = 0,2, \epsilon = 0,057$; б – для $c = 0,17396, \epsilon = 0,09$

одинаково легко осуществляют переходы с равновесия на цикл и обратно, тем самым образуя новый тип стохастического аттрактора «равновесие+цикл».

В статье кратко представлен анализ детерминированных аттракторов модели экономической динамики Гудвина. Проведены результаты исследования чувствительности стохастических аттракторов на вносимые аддитивные возмущения. С помощью метода функции стохастической чувствитель-

ности можно объяснить возможные переходы между аттракторами. Основываясь на данной функции, построены доверительные области, в которые с заданной вероятностью попадают случайные состояния системы. На основе этих данных проведен анализ критических значений интенсивностей шумов, при которых происходят переходы между бассейнами притяжения аттракторов.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» 1.1099.2011 и поддержана грантом РФФИ №12-01-31210мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Goodwin R.M.** The Nonlinear Accelerator and the Persistence of Business Cycles // *Econometrica* – 1951. – № 1. – Vol. 19. – P. 1–17.
2. **Lorenz H.W.** Nonlinear dynamical economics and chaotic motion. – Springer: Berlin Heidelberg New York, 1993.
3. **Lorenz H.W., Nusse H.E.** Chaotic attractors, chaotic saddles, and fractal basin boundaries: Goodwin's nonlinear accelerator model reconsidered // *Chaos, Solutions and Fractals* – 2002. – № 13. – P. 957–965.
4. **Jakimowicz A.** Catastrophes and chaos in business cycle theory // *Proc. of the 4th Polish Symp. on Econo- and Sociophysics, Rzeszow.* – Poland, 2009.
5. **Yoshida H., Asada T.** Dynamic analysis of policy lag in a Keynes-Goodwin model: Stability, instability, cycles and chaos // *J. of Economic Behavior and Organization.* – 2007. – № 3 – Vol. 62. – P. 441–469.
6. **Li S., Li Q., Li J., Feng J.** Chaos prediction and control of Goodwin's nonlinear accelerator model // *Nonlinear analysis: Real world applications.* – 2011. – № 12. – P. 1950–1960.
7. **Cao J., Jiang H.** Stability and Hopf bifurcation

analysis on Goodwin model with three delays // *Chaos, Solutions and Fractals.* – 2011. – № 44. – P. 613–618.

8. **Башкирцева И.А., Екатеринбург Е.Д., Рязанова Т.В., Сысолягина А.А.** Математическое моделирование стохастических равновесий и бизнес-циклов модели Гудвина // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2013. – № 1. – Т. 5. – С. 107–118.

9. **Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И.** Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979.

10. **Bashkirtseva I.A., Ryashko L.B.** Sensitivity analysis of the stochastically and periodically forced Brusselator // *Physica A.* – 2000. – Vol. 278. – P. 126–239.

11. **Ryashko L., Bashkirtseva I.** Sensitivity analysis of stochastic attractors and noise-induced transitions for population model with Allee effect // *Chaos.* – 2011. – Vol. 21. – 047514 p.

12. **Ryashko L., Bashkirtseva I.** Stochastic sensitivity analysis of noise-induced excitement in a prey-predator plankton system // *Frontiers in Life Science.* – 2011. – Vol. 5. – P. 141–148.

REFERENCES

1. **Goodwin R.M.** The Nonlinear Accelerator and the Persistence of Business Cycles / *Econometrica* – 1951. – № 1. – Vol. 19. – P. 1–17.
2. **Lorenz H.W.** Nonlinear dynamical economics and chaotic motion. – Springer: Berlin Heidelberg New York, 1993.
3. **Lorenz H.W., Nusse H.E.** Chaotic attractors, chaotic saddles, and fractal basin boundaries: Goodwin's nonlinear accelerator model reconsidered / *Chaos, Solutions and Fractals* – 2002. – № 13. – P. 957–965.
4. **Jakimowicz A.** Catastrophes and chaos in business cycle theory / *Proc. of the 4th Polish Symp. on Econo- and Sociophysics, Rzeszow.* – Poland, 2009.

5. **Yoshida H., Asada T.** Dynamic analysis of policy lag in a Keynes-Goodwin model: Stability, instability, cycles and chaos / *J. of Economic Behavior and Organization.* – 2007. – № 3 – Vol. 62. – P. 441–469.

6. **Li S., Li Q., Li J., Feng J.** Chaos prediction and control of Goodwin's nonlinear accelerator model / *Nonlinear analysis: Real world applications.* – 2011. – № 12. – P. 1950–1960.

7. **Cao J., Jiang H.** Stability and Hopf bifurcation analysis on Goodwin model with three delays / *Chaos, Solutions and Fractals.* – 2011. – № 44. – P. 613–618.

8. **Bashkirtseva I. A., Ekaterinchuk E.D., Rya-**



zanova T.V., Sysolyatina A.A. Matematicheskoe modelirovanie stohasticheskikh ravnovesiy I bisness-ciklov modeli Goodwin / Komputernoe issledovanie I modelirovanie. – 2013. – № 1. – Т. 5. – S. 107–118. (rus)

9. Ventcel A.D., Freindlin M.I. Fluctuazii v dinamicheskikh systemah pod deystviem malih sluchainah vozmusheniy. – Moscow: Nauka, 1979. (rus)

10. Bashkirtseva I.A., Ryashko L.B. Sensitivity analysis of the stochastically and periodically

forced Brusselator / Physica A. – 2000. – Vol. 278. – P. 126–239.

11. Ryashko L., Bashkirtseva I. Sensitivity analysis of stochastic attractors and noise-induced transitions for population model with Allee effect / Chaos. – 2011. – Vol. 21. – 047514 p.

12. Ryashko L., Bashkirtseva I. Stochastic sensitivity analysis of noise-induced excitement in a prey-predator plankton system / Frontiers in Life Science. – 2011. – Vol. 5. – P. 141–148.

ЕКАТЕРИНЧУК Екатерина Дмитриевна – магистрант кафедры математической физики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620083, Россия, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51.

E-mail: ek.ekaterinchuk@gmail.com

EKATERINCHUK, Ekaterina D. *Ural Federal University.*

620083, Lenina Ave. 51, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: Ek.Ekaterinchuk@gmail.com

РЯЗАНОВА Татьяна Владимировна – доцент кафедры математической физики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кандидат физико-математических наук.

620083, Россия, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51.

E-mail: Tatyana.Ryazanova@usu.ru

RYAZANOVA, Tatyana V. *Ural Federal University.*

620083, Lenina Ave. 51, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: Tatyana.Ryazanova@usu.ru

РЯШКО Лев Борисович – профессор кафедры математической физики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор физико-математических наук.

620083, Россия, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51.

E-mail: Lev.Ryashko@usu.ru

RYASHKO, Lev B. *Ural Federal University.*

620083, Lenina Ave. 51, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: Lev.Ryashko@usu.ru

УДК 004.896

А.С. Антонова, К.А. Аксёнов

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО И ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТ

A.S. Antonova, K.A. Aksyonov

APPLICATION OF THE SIMULATION AND EVOLUTIONARY MODELLING IN THE SCHEDULING

Рассмотрена модификация генетического алгоритма имитацией отжига и поиском новизны применительно к задаче планирования работ. Предложен метод мультиагентной генетической оптимизации, реализующий различные стратегии поиска решения, включая модуль имитации. В результате сравнения методов планирования выявлено: во-первых, непригодность метода MS Project для решения рассматриваемой задачи; во-вторых, преимущество метода мультиагентной генетической оптимизации при анализе качества решения и недостаток метода при рассмотрении его производительности. Предложены пути преодоления недостатков метода мультиагентной генетической оптимизации и сформулированы цели дальнейших исследований.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ; ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ; АЛГОРИТМ ИМИТАЦИИ ОТЖИГА; ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОПТИМИЗАЦИЯ СУБПОДРЯДНЫХ РАБОТ.

This paper considers a genetic algorithm modification based on the annealing simulation and novelty search in applying to the scheduling problem. We propose a multiagent genetic optimization method implementing different decision searching strategies, including a simulation module. The comparison of the different scheduling methods has shown: firstly, the unsuitability of the MS Project planning method to solve the formulated problem; and secondly, both the advantage of the multiagent genetic optimization method in terms of economic effect and disadvantage in terms of performance. Some techniques to reduce the impact of the method's disadvantage are proposed in the conclusion, as well as the aims of future work.

SCHEDULING; GENETIC ALGORITHMS; ANNEALING SIMULATION ALGORITHM; SIMULATION; SUBCONTRACT WORK OPTIMIZATION.

Задача планирования работ — одна из ключевых задач управления организационно-техническими системами. Неэффективное планирование может привести к финансовым потерям, потерям качества и сервиса предоставляемых товаров или услуг, снижению конкурентоспособности компании. С задачей планирования сталкиваются предприятия различных сфер деятельности, в т. ч. производственные и проектные организации, торговые центры, больницы, центры обработки запросов.

Существует ряд постановок задачи планирования в зависимости от сферы ее применения: календарное планирование операций [1–4], планирование распределения ограниченного количества ресурсов по работам [5, 6], задача коммивояжера [7]. При-

менение генетической оптимизации при решении задач планирования работ с заданными ограничениями подробно освещено в литературе [1–7]. Одним из недостатков генетических подходов является высокая зависимость качества принимаемого решения от способа реализации генетических операторов и стратегии поиска экстремума [8]. Рассмотрим оптимизацию решения задачи планирования проектных работ с использованием эволюционных вычислений [9], модифицированных алгоритмами имитации отжига и поиска новизны с целью повышения качества решения задачи.

Обзор работ

В общем виде задача планирования работ формулируется как задача опреде-



ления такой последовательности работ, которая удовлетворяла бы установленным ограничениям и оптимизировала значения целевых функций. При решении задачи планирования обычно рассматриваются возобновляемые ресурсы (например, трудовые ресурсы или оборудование). Тем не менее для определенных задач (например, в производственном планировании) необходимо также учитывать невозобновляемые ресурсы.

В различных исследованиях в зависимости от решаемых задач рассматриваются различные объекты оптимизации. Классическая целевая функция задачи планирования по минимизации времени выполнения работ применяется в исследованиях Срай-прасерта и Давуда [2], Осабы и др. [7]. Целевая функция по минимизации штрафов за невыполнение ограничений используется в работах Каровой и др. [4], Янга и Ву [6]. Обе упомянутые целевые функции рассматривают Дхингра и Чандна [5].

Существуют различные способы оценки значения целевой функции: аналитические методы, имитационное моделирование, искусственные нейронные сети, нечеткие системы, компонентное моделирование. Аналитические методы являются наиболее популярными; недостаток их применения заключается в отсутствии учета динамического характера поведения сложной системы. Данный недостаток преодолевается при использовании имитационной модели для оценки целевой функции [7]. Интеграция эволюционного и имитационного моделирования позволяет ограничить пространство поиска и усилить эвристическую оптимизацию за счет учета динамически меняющихся ограничений задачи планирования.

Ни в одном из приведенных выше исследований не рассмотрена оптимизация привлекаемых субподрядных работ, в то время как данная задача встает перед всеми проектными организациями и даже перед предприятиями с серийным производством. Задача оптимизации субподрядных работ связана с планированием привлечения субподряда с целью максимальной загрузки собственных трудовых ресурсов. В литературе исследуется проблема оптимального вы-

бора набора субподрядчиков из множества с применением методов искусственного интеллекта (например, в работе Чена и др. [10]). Методика оптимизации субподрядных работ с применением имитационного моделирования и эвристик предложена нами в [11]. В настоящей статье рассматривается новый метод оптимизации субподрядных работ на основе применения модифицированного генетического алгоритма.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу планирования уникальных проектов, связанную с определением календарного плана работ. Все операции проектов должны быть выполнены с учетом временных ограничений, которые определяются путем переговоров с заказчиками. В случае нехватки собственных трудовых ресурсов необходимо привлекать субподрядные ресурсы для выполнения всех операций в срок.

Рассмотрим две целевые функции задачи: минимизацию стоимости субподрядных работ и минимизацию суммарного времени простоя собственных отделов. Последняя целевая функция актуальна для компаний, применяющих фиксированную оплату труда, поскольку в этом случае простой сотрудников также оплачивается, что не выгодно для компании.

Для рассматриваемой задачи планирования проектных работ сделаны следующие допущения:

- 1) отдельный проект состоит из ряда операций с известным временем обработки, датами раннего и позднего начала, трудозатратами и стоимостью;
- 2) выполнение операций требует наличия возобновляемых трудовых ресурсов (собственных или субподрядных);
- 3) операции не могут быть прерваны;
- 4) субподрядные работы могут использоваться для выполнения части операции;
- 5) в случае освобождения собственных ресурсов субподрядные работы могут быть прерваны и переданы для выполнения собственными ресурсами;
- 6) субподряд доступен каждый день в неограниченном количестве (например, при работе с несколькими субподрядчиками).

Опишем задачу планирования проектных работ с помощью следующих обозначений.

Индексы: i – индекс проекта, $i = 1, 2, \dots, P$; j – индекс операции в проекте, $j = 1, 2, \dots, Op_i$; w – индекс отдела компании, $w = 1, 2, \dots, V$; t – индекс времени, $t = 0, 1, 2, \dots, T$.

Управляемые переменные: $TB(i, j)$ – набор дат начала операций.

Начальные параметры: $ES(i, j)$ – дата раннего начала операции (i, j); $LS(i, j)$ – дата позднего начала операции (i, j); SL_w – количество человек в отделе w ; $SLO(i, j, w)$ – количество человек отдела w , необходимых для выполнения операции (i, j); $SS(i, j)$ – стоимость субподрядных работ для операции (i, j) в день.

Параметры, формируемые в процессе принятия решений:

$Active(i, j, t)$ – признак активности (выполнения) операции (i, j) в момент времени t .

$$Active(i, j, t) = \begin{cases} 1, & \text{если операция } (i, j) \\ & \text{выполняется в момент } t \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$RD(t, w)$ – количество человек отдела w , необходимых для выполнения всех активных операций в момент времени t .

$$RD(t, w) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{Op_i} [Active(i, j, t) \cdot SLO(i, j, w)].$$

$VF(t, w)$ – количество свободных человек отдела w в момент t .

$$VF(t, w) = \begin{cases} SL_w - RD(t, w), \\ & \text{если } RD(t, w) \leq SL_w \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$V_{sc}(i, j)$ – суммарный объем субподрядных работ, привлеченных для выполнения операции (i, j).

Постановка задачи:

$$OF_1 = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{Op_i} (SS(i, j) \cdot V_{sc}(i, j)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$OF_2 = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{w=1}^V VF(t, w)}{T \cdot V} \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$TB(i, j) \in [ES(i, j); LS(i, j)] \forall i, \forall j. \quad (3)$$

Целевая функция (1) минимизирует

суммарную стоимость субподрядных работ на портфель проектов. Целевая функция (2) минимизирует суммарный простой собственных отделов. Ограничения (3) накладывают временные рамки на даты начала выполнения операций.

Генетический алгоритм на основе имитации отжига и поиска новизны

Генетические алгоритмы (ГА) – один из эволюционных подходов, которые могут использоваться для решения задач управления сложными системами в короткое время [9]. Методика применения ГА включает в себя выполнение следующих шагов: 1) выбор способа кодирования решения задачи (фенотипа) в особь-хромосому (генотип); 2) определение метода оценки функции пригодности (ФП) решения; 3) описание генетических операторов (ГО); 4) генерация начальной популяции и работа ГА. В статье рассмотрена модификация простого генетического алгоритма на основе применения алгоритмов имитации отжига и поиска новизны с целью повышения качества решения задачи планирования.

Кодирование хромосомы. В литературе представлены различные способы кодирования хромосомы: кодирование последовательности операций [1, 4, 7], кодирование приоритетов операций [2], кодирование дат начала операций [3], кодирование назначения ресурсов на операции [5, 6]. Мы применяем метод кодирования смещения дат начала работ благодаря отсутствию избыточности при кодировании и поддержке учета временных ограничений.

Хромосома ГА кодирует двоичным кодом (0/1) смещение дат начала операций от начального плана работ вправо или влево по оси времени. Диапазон смещения составляет две недели в каждую сторону от начальной даты. С учетом данного факта размер хромосомы составляет $5r$ ген, где r – число анализируемых операций, 5 – число ген, необходимое для кодирования одной операции (четыре гена для двоичного кодирования $2^4 = 16$ дней смещения и один ген для кодирования направления смещения).

Модификация генетического алгоритма. Одним из важнейших понятий ГА является

понятие новизны, связанное с возможностью появления в среде новых элементов и взаимодействий. Два типа новизны выделено в [8]: *комбинаторная новизна*, при которой новые виды появляются благодаря комбинированию уже существующих, и *созидательная новизна*, при которой новые виды не воспроизводимы путем комбинации имеющихся видов. Вопрос о принципиальной реализуемости второго типа новизны остается открытым.

Рассмотрим поиск комбинаторной новизны как способ адаптации в открытых системах. Для реализации данного подхода модифицируем простой ГА путем введения понятия «оригинальность решения» в качестве меры приспособленности решения к условиям среды [8]. Оригинальность особи в популяции будем определять с помощью численных преобразований матрицы расстояний Хемминга между особями.

Определим матрицу хемминговых расстояний между парами хромосом популяции $H = (h_{ij})_{i=1, j=1}^N$, где $h_{ij} = d(Ch_i, Ch_j)$ – хеммингово расстояние между i -й и j -й хромосомами (Ch_i и Ch_j), равное количеству позиций с несовпадающими значениями генов в хромосомах Ch_i и Ch_j ; N – количество хромосом в популяции. Матрица H является симметричной и элементы ее главной диагонали равны нулю $\forall i, j = 1, \bar{N}$ ($h_{ij} = h_{ji}$) \wedge ($h_{ii} = 0$).

Сопоставим матрице H матрицу весов оригинальности $W = (w_{ij})_{i=1, j=1}^N$, каждый элемент которой представляет собой вес соответствующего значения хеммингова расстояния, определяемый согласно правилу:

$$w_{ij} = \frac{R-1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{h_{ij}} + 1, \quad (4)$$

где w_{ij} – вес соответствующего значения хеммингова расстояния, определяемый как квадратичная функция, возрастающая в диапазоне от единицы до R при изменении h_{ij} в диапазоне от нуля до L ; L – длина хромосомы; R – максимальный вес оригинальности хромосомы в паре, $R > 0$.

С учетом понятия оригинальности хромосомы рассмотрим две стратегии скрещивания хромосом. Первая стратегия – *стратегия поиска оригинальности* (СПО) [8] – ориентирована на поиск новых ком-

бинаторных решений в популяции путем скрещивания различных по кодированию хромосом. Вторая стратегия – *стратегия поиска экстремума* (СПЭ) [9] – ориентирована на целенаправленный поиск лучших хромосом путем скрещивания наиболее приспособленных к среде особей. Приспособленность i -й особи к среде оценивается ее функцией пригодности FF_i , $I = 1..N$.

Определим матрицы вероятностей скрещиваний хромосом на основе предложенных стратегий:

$$P_{\text{СПО}} = (p_{ij}^{\text{СПО}})_{i=1, j=1}^N, \quad p_{ij}^{\text{СПО}} = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^N w_{ij}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{СПЭ}} = (p_i^{\text{СПЭ}})_{i=1}^N, \quad p_i^{\text{СПЭ}} = \frac{FF_i}{\sum_{i=1}^N FF_i}. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) ячейки матриц заполняются значениями вероятностей согласно закону рулетки [9]. В случае применения стратегии СПО вес оригинальности хромосомы служит мерой оценки качества хромосомы. В случае применения стратегии СПЭ функция пригодности хромосомы служит мерой оценки качества.

Алгоритм имитации отжига (АИО) [8] предназначен для реализации комбинации предложенных стратегий скрещивания хромосом в ходе работы ГА. АИО основан на аналогии с процессом отжига металла, в результате которого появляются его новые свойства. Рассмотрим методику интегрированного применения АИО и ГА.

Шаг 1. Установить параметры АИО: начальное значение управляемого параметра t_z ; значение параметра α , контролирующего скорость изменения температуры отжига, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Шаг 2. Задать параметры ГА: количество поколений K ; размер особи L ; вероятности применения генетических операторов. Установить номер текущего поколения Z : $Z = 1$. Сформировать начальную популяцию.

Шаг 3. Применить к текущей популяции Z генетические операторы с вероятностью, зависящей от значения t_z . Увеличить номер текущего поколения $Z = Z + 1$. Изме-

нить значение управляемого параметра t_z [8]:

$$t_{z+1} = t_z + \alpha \cdot t_z. \quad (7)$$

Шаг 4. Проверить условие окончания работы ГА: $Z > K$. Если условие выполняется, то переход на Шаг 5, иначе – на Шаг 3.

Шаг 5. Останов.

Вероятности применения генетических операторов определяются на основе АИО с целью учета динамического характера работы операторов.

Оператор кроссинговера. Вероятности выбора первого и второго родителя из популяции в поколении Z для оператора кроссинговера (ОК) описаны ниже. Вероятность выбора первого родителя должна учитывать как случайный характер выбора, так и целенаправленный выбор на основе стратегии поиска экстремума (6). При этом вероятность случайного выбора должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ – возрастать. С учетом сказанного выше определим вероятность выбора первого родителя i в поколении Z по формуле:

$$P_i^Z(\text{ОК}) = \frac{1}{N} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right) + p_i^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right). \quad (8)$$

Вероятность выбора второго родителя должна учитывать предложенные стратегии поиска оригинальности и поиска экстремума, при этом вероятность применения СПО (5) должна снижаться при эволюции поколений, а вероятность применения СПЭ (6) – возрастать. С учетом сказанного выше определим вероятность выбора второго родителя j для первого родителя i в поколении Z по формуле:

$$P_j^Z(\text{ОК}) = p_j^{\text{СПО}} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right) + p_j^{\text{СПЭ}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right). \quad (9)$$

Операторы мутации и инверсии. Вероятность применения оператора мутации (ОМ) в поколении Z определена ниже с учетом снижения вероятности при эволюции по-

колений с целью сохранения полученного генетического материала [8]:

$$P_z(\text{ОМ}) = P_0(\text{ОМ}) \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{t_z}\right) \right), \quad (10)$$

где $P_0(\text{МО})$ – начальное значение вероятности применения оператора мутации.

Вероятность применения оператора инверсии в популяции Z описывается по аналогии с вероятностью применения оператора мутации.

Функция пригодности. Рассмотрим функцию пригодности, описанную с использованием линейной свертки нормализованных разнородных критериев (1) и (2):

$$\text{FF} = \omega_1 \left(\frac{\text{OF}_1^{\text{Init}}}{\text{OF}_1} \right) + \omega_2 \left(\frac{\text{OF}_2^{\text{Init}}}{\text{OF}_2} \right) \rightarrow \max, \quad (11)$$

где ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты, $\omega_1 + \omega_2 = 1$; $\text{OF}_1^{\text{Init}}, \text{OF}_2^{\text{Init}}$ – начальные значения целевых функций, полученные путем экспертной оценки дат начала операций.

Для оценки функции пригодности применим мультиагентную модель процессов преобразования ресурсов (МППР), описанную в [12]. Модель МППР предназначена для поддержки процесса принятия решений. Управляемые переменные и начальные параметры, описанные при постановке задачи, подаются на вход модели системы. Параметры, формируемые в процессе принятия решений, являются выходами модели. В модели МППР агенты применяются для реализации алгоритма распределения ресурсов, а имитационное моделирование – для описания процесса выполнения операций. Алгоритм распределения ресурсов, предложенный нами в [11], позволяет назначать исполнителей операций в соответствии с допущениями, сделанными при постановке задачи.

Интеграция модели МППР и информационной технологии (ИТ) генетической оптимизации реализована в программе мультиагентной генетической оптимизации (МГО). Программа МГО разработана на основе системы динамического моделирования ситуаций VPsim.MAS и системы технико-экономического проектирования

BPsim.MSN [12]. Алгоритм работы программы приведен в [13].

Результаты экспериментов

Рассмотрим компанию «Телесистемы», включающую отделы проектный, производственный и материально-технического обеспечения. Целью планирования является минимизация времени простоя собственных отделов и стоимости привлекаемого субподряда.

Детальная постановка задачи приведена в [11]. Модель МППР исполнения работ разработана с целью оценки функции пригодности особей по формуле (11). Модель МППР реализует распределение ресурсов согласно допущениям, сделанным при постановке задачи. Адекватность модели показана в [11] с помощью оценки выполнения пяти проектов. В настоящем исследовании

на вход модели подается следующая информация: количество проектов – десять с 35 операциями; интервал времени моделирования $T = 430$ дней (год и три месяца); даты раннего и позднего начала операций определяются путем смещения первоначального календарного плана работ вправо и влево по оси времени на две недели.

Для ГА в ходе работы ИТ генетической оптимизации были заданы следующие параметры: 1) размер популяции – десять особей; 2) размер особи – 175 ген (5 ген на кодирование каждой из 35 рассматриваемых операций портфеля); 3) применяемые ГО – репродукция на основе рулетки, пятиточечный кроссинговер с вероятностью применения, определяемой по формулам (8) и (9), пятиточечная мутация с начальной вероятностью применения 10 % и динамической вероятностью, заданной формулой (10), инверсия

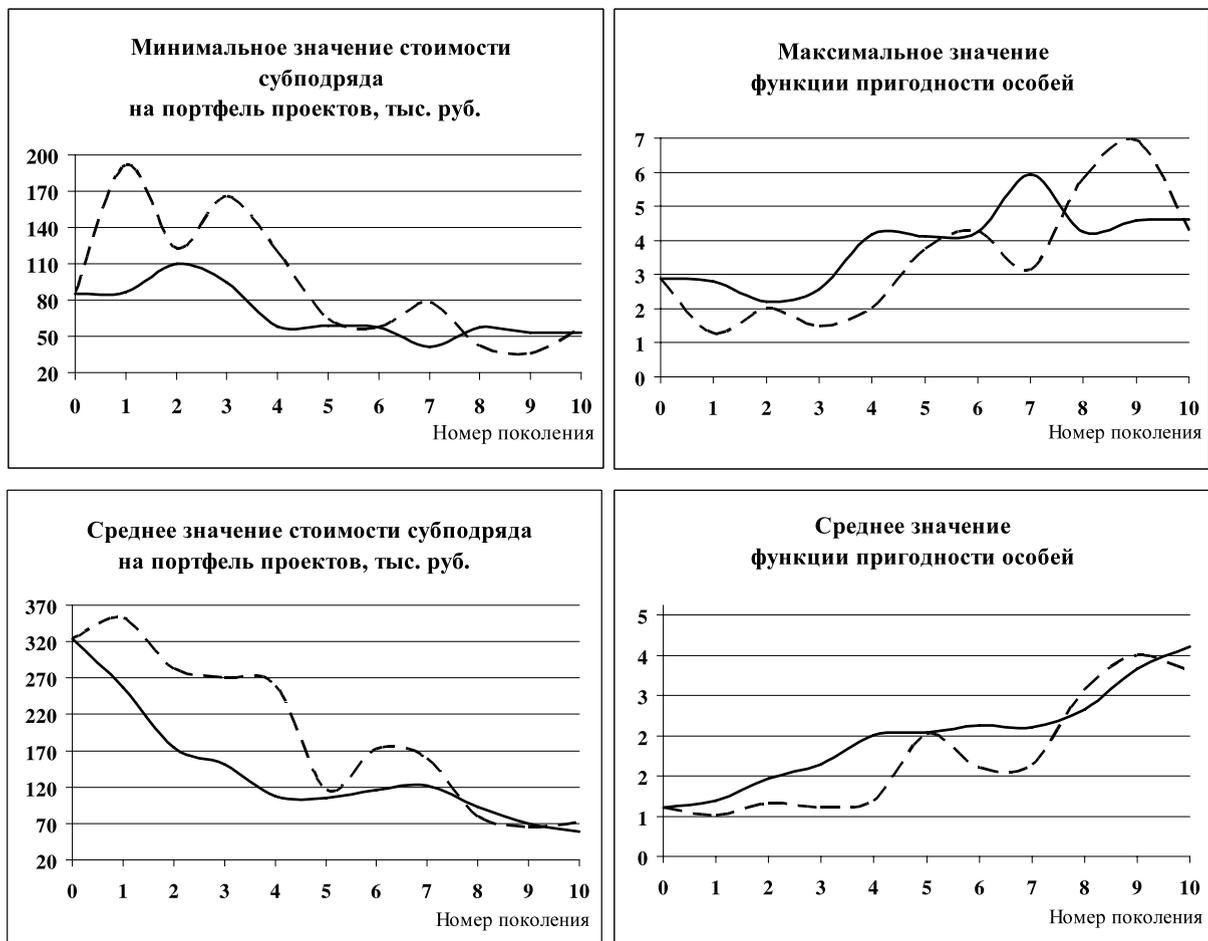


Рис. 1. Сравнение работы простого и модифицированного ГА

с начальной вероятностью 5 %; 4) критерий останова алгоритма – смена десяти поколений; 5) генерация случайной начальной популяции; 6) следующие значения параметров АИО – $t_{20} = 1$; $\alpha = 0,9$; $K = 10$.

Было проведено сравнение результатов работы простого и модифицированного ГА. Для наглядности сравнения оба алгоритма исходили из одной начальной популяции. В результате работы программы МГО получена зависимость значений ФП особей популяции и значений целевых функций задачи от смены поколений. На рис. 1 приведены графики изменения в ходе работы простого ГА (сплошная линия) и модифицированного ГА (пунктирная линия) максимального и среднего значений ФП особей (11), а также графики изменения минимального и среднего значений оптимизируемой при планировании величины – суммарной стоимости субподрядных работ (1). Решение поставленной задачи предполагает максимизацию функции пригодности особей ГА и минимизацию стоимости субподрядных работ.

На начальной стадии работы модифицированного ГА (смена поколений 1–5) в составе ФП преобладает компонент поиска новизны (поиска оригинальных решений), с чем связаны колебания максимального и среднего значения ФП, не всегда обеспечивающие достижение лучших значений ФП и оптимизируемой величины по сравнению с работой простого ГА. Однако найденные

оригинальные решения становятся основой целенаправленного поиска экстремума на поздних стадиях работы ГА (смена поколений 6–10), что приводит к повышению качества найденного решения. Для поставленной задачи найденная в результате применения модифицированного ГА стоимость субподрядных работ (35 189 руб.) на 14 % ниже стоимости субподрядных работ, полученной с использованием простого ГА (41 050 руб.).

Задача планирования проектных работ для компании «Телесистемы» была решена также с использованием метода перераспределения ресурсов MS Project и эвристико-имитационного метода (ЭИ), описанного в [11].

Программное обеспечение MS Project 2007 предоставляет возможность проведения перераспределения ресурсов по работам с целью избежания превышения доступности собственных ресурсов. В рассматриваемой задаче календарного планирования для начального плана работ, составленного экспертами, наблюдается превышение доступности ресурса производственного отдела (рис. 2). На рисунке по оси x представлены временные интервалы длительностью 12 дней, по оси y – процентная загрузка. Превышение доступности собственных ресурсов (временные интервалы, для которых необходимо применение субподряда) показаны на рисунке темными прямоугольниками выше горизонтальной линии стопро-

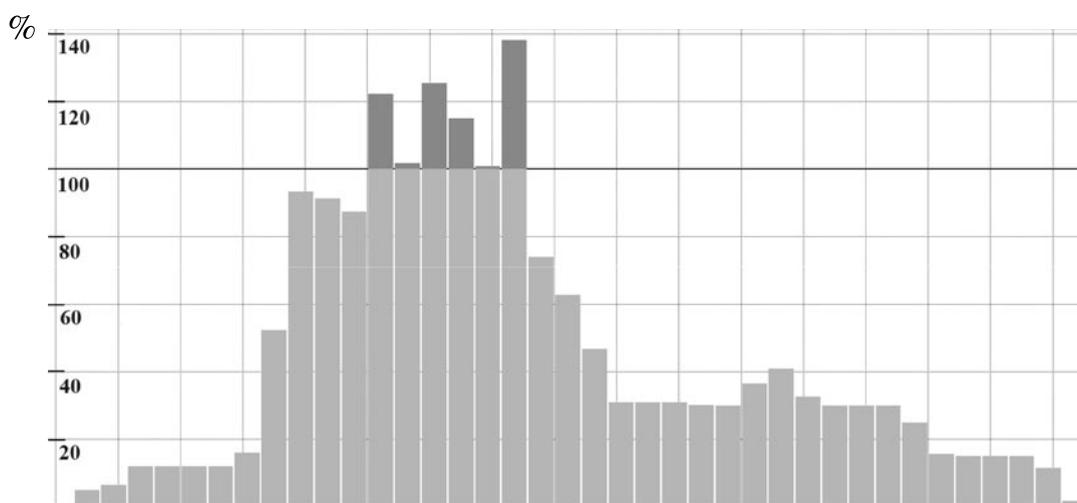


Рис. 2. Процентная загрузка производственного отдела для начального плана работ в MS Project

центной загрузки.

Применение метода перераспределения ресурсов MS Project позволило снизить стоимость субподрядных работ до нуля (т. е. целевые функции (1) и (2) достигли своих оптимальных значений). Но временные ограничения (3) не были удовлетворены при применении данного метода. Следовательно, метод перераспределения ресурсов MS Project не пригоден для решения поставленной задачи планирования проектных работ.

ЭИ метод основан на анализе выходных характеристик модели МППР. Работа ЭИ метода подразумевает выполнение ряда шагов: 1) анализ результатов моделирования — стоимости субподряда и величины простоя отделов; 2) поиск узких мест, связанных с операциями, требующими высоких затрат на субподряд; 3) смещение дат начала выделенных операций на период, определяемый ЭИ информационной технологией; 4) передача скорректированной модели на стадию проведения экспериментов и оценка результатов экспериментов. ЭИ информационная технология была разработана с использованием технологии построения визардов системы BPsim.MSN. Детальный алгоритм работы технологии приведен в [11].

Проведем сравнение процентных загрузок собственных ресурсов для решений, найденных с помощью предложенных методов поиска. На рис. 3 приведена гистограм-

ма процентной загрузки производственного отдела для решений, найденных методами МГО и ЭИМ. Как следует из графика, загрузка отдела меняется незначительно при использовании разных методов. Тем не менее в решении, найденном с помощью метода МГО, достигается снижение суммарной стоимости субподрядных работ на 30 % по сравнению с использованием ЭИ метода. Данный факт связан с нацеленностью эволюционной компоненты метода МГО на поиск решения с распределением ресурсов, оптимальным по значению субподрядной стоимости, в то время как алгоритм работы ЭИМ прекращает поиск в случае перехода за пороговое значение субподрядной стоимости, заданное экспертами.

При применении обоих методов все временные ограничения были удовлетворены. Суммарный простой отдела свидетельствует о наличии резерва собственных трудовых ресурсов для реализации дополнительных проектов. Экономический эффект от использования метода МГО при решении задачи планирования на предприятии «Телесистемы» составил 417 000 руб. в год, что на 12 % выше экономического эффекта от применения ЭИ метода для решения той же задачи.

В результате проведенного сравнения сделан вывод о предпочтительности метода МГО с точки зрения эффективности най-

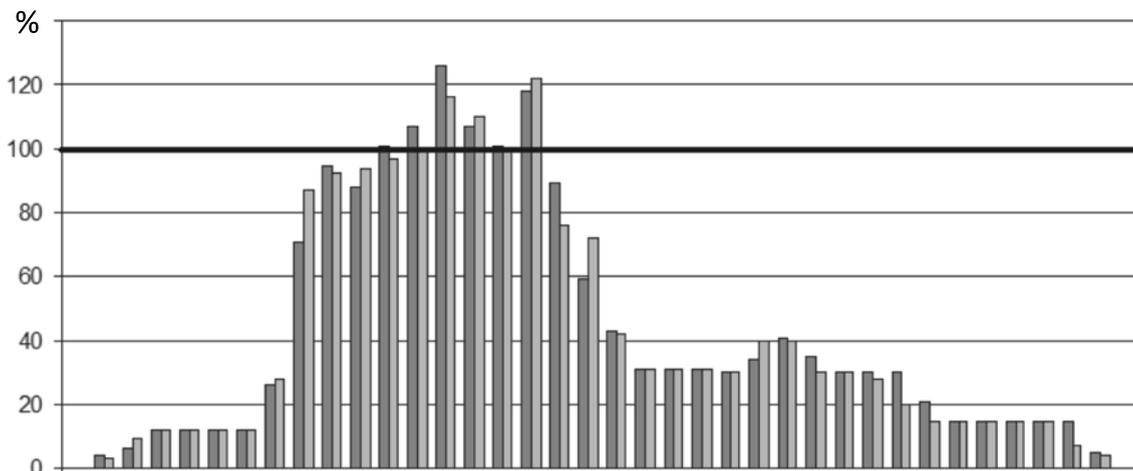


Рис. 3. Процентные загрузки производственного отдела при применении различных методов поиска решения (■) ЭИМ; (□) МГО

денного решения. Применение при решении задачи планирования проектных работ генетической оптимизации на основе интеграции имитационного и эволюционного моделирования позволяет повысить эффективность найденного решения за счет учета в модели динамического характера распределения ресурсов по работам и проведения генетическим алгоритмом направленного поиска в пространстве решений.

Проведем сравнение методов ЭИ и МГО с точки зрения производительности путем сравнения времени работы методов. Время работы ЭИ метода $T_{ЭИМ}$ определяется с помощью суммы времени работы ЭИ информационной технологии $T_{ЭИИТ}$ и времени работы модели МППР $T_{МППР}$. Сумма умножается на количество повторений контура поиска решения ЭИ методом $X_{Повтор}$. Поскольку $T_{ЭИИТ} \ll T_{МППР}$, мы можем пренебречь слагаемым $T_{ЭИИТ}$ и определить время $T_{ЭИМ}$ следующим образом:

$$T_{ЭИМ} = X_{Повтор} \cdot T_{МППР}$$

Время работы метода МГО $T_{МГО}$ определяется с помощью суммы времени работы ИТ генетической оптимизации $T_{ИТГО}$ и времени работы модели МППР $T_{МППР}$, умноженном на размер популяции N . Сумма умножается на количество поколений K . Поскольку $T_{ИТГО} \ll T_{МППР}$, мы можем пренебречь слагаемым $T_{ИТГО}$ и определить время $T_{МГО}$ следующим образом:

$$T_{МГО} = K \cdot N \cdot T_{МППР}$$

Для задачи планирования проектных работ использованы следующие значения параметров: $X_{Повтор} = 3$, $K = 10$, $N = 10$. В этом случае ЭИ метод оказывается предпочтительнее метода МГО, поскольку требует в 33 раза меньше времени на поиск решения. Данное обстоятельство связано с применением для оценки функции пригодности в методе МГО имитационной модели, к которой ГА обращается $K \cdot N$ раз. Время работы метода МГО достигает 30 мин при решении задачи планирования проектных работ.

В данной статье представлен метод мультиагентной генетической оптимизации для решения задачи планирования проектных работ на основе алгоритма имитации отжига, алгоритма поиска новизны, ге-

нетического алгоритма и мультиагентного имитационного моделирования. Метод объединяет три стратегии поиска: стратегию случайного поиска, стратегию поиска оригинальности и стратегию поиска экстремума с целью отражения динамической природы применяемых генетических операторов. Интеграция эволюционного и имитационного моделирования позволяет ограничить пространство поиска решений и адекватно оценить динамические функции пригодностей хромосом. Описанный метод реализован в программе МГО с помощью применения систем BPsim.MAS и BPsim.MSN. Программа объединяет имитационное, экспертное, мультиагентное, концептуальное и эволюционное моделирование. Применение метода МГО к решению реальной задачи планирования работ проведено в сравнении с методом MS Project и эвристико-имитационным методом. Метод перераспределения ресурсов MS Project признан непригодным для решения поставленной задачи вследствие отсутствия учета временных ограничений. В результате сравнения ЭИ метода и метода МГО достигнуто улучшение качества решения с учетом заданных ограничений при применении метода МГО.

Недостаток метода МГО – высокие временные затраты, в 33 раза превышающие аналогичные затраты при использовании ЭИ метода. Данное обстоятельство накладывает ограничения на размер популяции ГА (не более десяти хромосом) и число итераций работы ГА (не более десяти поколений).

Цель дальнейших исследований – повышение скорости сходимости предложенного модифицированного генетического алгоритма путем применения элитизма и алгоритмов табу. Предполагается проведение исследований, направленных на установление зависимости производительности работы метода МГО от размерности задачи. Планируется проведение сравнения эффективности работы классических методов решения задачи планирования работ и метода МГО.

Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0055, проект 2012-218-03-167.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Klimek M.** A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints // *Annals UMCS Informatica*. –2010. –Vol. 10. –Iss. 1. –P. 117–130.
2. **Sriprasert E., Dawood N.** Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry // *Proc. of CIB W78's 20th Internat. Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 Apr. 2003*. –P. 341–353.
3. **Abdel-Khalek H., Sherif M.H., el-Lacany A.M., Abdel-Magd Y.** Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms // *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*. –2011. –P. 289–297.
4. **Karova M., Petkova J., Smarkov V.** A genetic algorithm for project planning problem // *Proc. of Int. Scientific Conf. Computer Science*. –2008. –P. 647–651.
5. **Dhingra A., Chandna P.** A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm // *Internat. J. of Engineering, Science and Technology*. –2010. –Vol. 2. –№ 5. –P. 216–225.
6. **Yang F.-C., Wu W.-T.** A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses // *Internat. J. of Electronic Business Management*. –2012. –Vol. 10. –№ 3. –P. 182–193.
7. **Osaba E., Carballedo R., Diaz F.** Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP // *Proc. of IASTED Internat. Conf. Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, 25–27 June, 2012*. –P. 27–33.
8. **Зинченко, Л.А., Курейчик В.М., Редько В.Г.** (ред.). Бионические информационные системы и их практические применения. – М.: Физматлит, 2011. – 288 с.
9. **Емельянов, В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В.** Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
10. **Chen M.-Y., Tsai H.-C., Sudjono E.** Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network // *Internat. J. of Project Management*. –2001. –P. 349–356.
11. **Aksyonov K.A., Antonova A.S.** Application of simulation and intelligent agents to solve project management problem // *Internat. J. of Computer Science Engineering and Information Technology Research*. –2013. –Vol. 3. –№ 1. –P. 321–330 [электронный ресурс] / URL: http://www.tjprc.org/view_archives.php?year=2013&id=14&jtype=2&page=3 (дата обращения 26.09.2013).
12. **Aksyonov K., Bykov E., Dorosinskiy L., Smoliy E., Aksyonova O., Antonova A., Spitsina I.** Decision Support Systems Application to Business Processes at Enterprises in Russia in Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains. InTech, 2011. –P. 83–108 [электронный ресурс] / URL: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/decision-support-systems-application-to-business-processes-at-enterprises-in-russia> (дата обращения 26.09.2013).
13. **Антонова, А.С., Аксенов К.А.** Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6 [электронный ресурс] / URL: <http://www.science-education.ru/106-7409> (дата обращения 26.09.2013).

REFERENCES

1. **Klimek M.** A genetic algorithm for the project scheduling with the resource constraints / *Annals UMCS Informatica*. –2010. –Vol. 10. –Iss. 1. –P. 117–130.
2. **Sriprasert E., Dawood N.** Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry / *Proc. of CIB W78's 20th Internat. Conf. Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23–25 Apr. 2003*. –P. 341–353.
3. **Abdel-Khalek H., Sherif M.H., el-Lacany A.M., Abdel-Magd Y.** Financing – scheduling optimization for construction projects by using genetic algorithms / *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*. –2011. –P. 289–297.
4. **Karova M., Petkova J., Smarkov V.** A genetic algorithm for project planning problem / *Proc. of Int. Scientific Conf. Computer Science*. –2008. –P. 647–651.
5. **Dhingra A., Chandna P.** A bi-criteria M-machine SDST flow shop scheduling using modified heuristic genetic algorithm / *Internat. J. of Engineering, Science and Technology*. –2010. –Vol. 2. –№ 5. –P. 216–225.
6. **Yang F.-C., Wu W.-T.** A genetic algorithm based method for creating impartial work schedules for nurses / *Internat. J. of Electronic Business Management*. –2012. –Vol. 10. –№ 3. –P. 182–193.
7. **Osaba E., Carballedo R., Diaz F.** Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP / *Proc. of IASTED Internat. Conf. Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, 25–27 June, 2012*. –P. 27–33.

8. **Zinchenko L.A., Kureichik V.M., Redko V.G.** Bionic information systems and their practical applications. –Moscow: Fizmatlit, 2011. –288 s. (rus)
9. **Emelyanov V.V., Kureichik V.M., Kureichik V.V.** Theory and practice of evolutionary modelling. –Moscow: Fizmatlit, 2003. –432 s. (rus)
10. **Chen M.-Y., Tsai H.-C., Sudjono E.** Evaluating subcontractor performance using evolutionary fuzzy hybrid neural network / Internat. J. of Project Management. –2001. –P. 349–356.
11. **Aksyonov K.A., Antonova A.S.** Application of simulation and intelligent agents to solve project management problem / Internat. J. of Computer Science Engineering and Information Technology Research. –2013. –Vol. 3. –№ 1. –P. 321–330. Available http://www.tjprc.org/view_archives.php?year=2013&id=14&jtype=2&page=3 (Accessed 26.09.2013).
12. **Aksyonov K., Bykov E., Dorosinskiy L., Smoliy E., Aksyonova O., Antonova A., Spitsina I.** Decision Support Systems Application to Business Processes at Enterprises in Russia in Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains. InTech, 2011. –P. 83–108 Available <http://www.intechopen.com/articles/show/title/decision-support-systems-application-to-business-processes-at-enterprises-in-russia> (Accessed 26.09.2013).
13. **Antonova A.S., Aksyonov K.A.** Genetic optimization for solving the project scheduling problem / Modern problems of science and education. –2012. –№ 6. Available <http://www.science-education.ru/106-7409> (Accessed 26.09.2013).

АНТОНОВА Анна Сергеевна – аспирант кафедры информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: antonovaannas@gmail.com

ANTONOVA, Anna S. Ural Federal University.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: antonovaannas@gmail.com

АКСЁНОВ Константин Александрович – доцент кафедры информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, кандидат технических наук.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: wiper99@mail.ru

AKSUONOV, Konstantin A. Ural Federal University.

620002, Mira Str. 19, Ekaterinburg, Russia.

E-mail: wiper99@mail.ru



УДК 519.254

*И.А. Карлов***ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУЩЕННЫХ ДАННЫХ ПРИ ЧИСЛЕННОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ***I.A. Karlov***THE MISSING VALUE ESTIMATION IN NUMERICAL MODELLING
OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS**

Рассмотрена проблема пропущенных значений в массивах данных при моделировании сложных динамических систем. Изучены различные типы пропусков и общие подходы к работе с данными, содержащими пропуски. Приведен обзор самых распространенных методов восстановления пропущенных данных. Представлен оригинальный гибридный адаптивный метод восстановления с нейро-нечетким управлением. Приведена оценка эффективности различных методов восстановления применительно к массивам данных, содержащих информацию о процессах в сложных динамических системах. Отдельное внимание уделено вопросу влияния наличия пропусков в данных на эффективность численных моделей.

ПРОПУЩЕННЫЕ ДАННЫЕ; НЕЙРОННЫЕ СЕТИ; НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ.

This paper is deals with the problem of missing values in the modelling of complex dynamic systems. Considered different types of missing values and general approaches to dealing with missing data. This paper provides an overview of the most common methods of missing data estimation, and presents an original hybrid adaptive method of estimation with neuro-fuzzy control. Evaluate the effectiveness of various methods of missing data estimating applied to data sets that contain information about the processes in complex dynamic systems. Special attention is paid to the impact of missing data presence on the effectiveness of the models.

MISSING DATA; NEURAL NETWORKS; FUZZY LOGIC; NUMERICAL MODELLING; HYBRID SYSTEMS.

Одним из подходов, используемых при моделировании процессов в сложных динамических системах, является использование статистических массивов данных, содержащих информацию о процессах, происходящих в системе, и построение на их основе индуктивных численных моделей. При этом качество построенных моделей, их соответствие реальным процессам, происходящим в системе, напрямую зависит от качества массива данных.

На практике при построении численной модели на основе статистических данных исследователи часто сталкиваются с проблемой пропущенных значений в массивах данных. Наличие пропусков существенно осложняет применение различных методов обработки информации, снижает эффек-

тивность статистических моделей и сказывается на качестве принимаемых управленческих решений.

Данная проблема возникает при численном моделировании в различных областях и свойственна как для технических, так и для социальных систем. Так, впервые, с проблемой пропущенных значений мы столкнулись при моделировании неустойчивости работы алюминиевого электролизера [1]. Число экземпляров, содержащих пропуски, достигало 10, а иногда и 15 %. Позже мы столкнулись с подобной проблемой при изучении зависимости детской смертности от показателей социально-экономического развития территорий [2, 3]. Здесь количество экземпляров данных с пропусками для различных массивов варьировалось в пределах от 3 до 25 %.

В представленной статье рассмотрены наиболее распространенные подходы к работе с данными, содержащими пропуски, приводится оригинальный метод восстановления пропусков в данных, дается оценка влияния наличия пропусков на эффективность численных моделей. Все результаты получены и проверены на реальных массивах данных, описывающих процессы в сложных динамических системах.

Основные подходы к работе с пропусками в массивах данных

На практике встречается несколько подходов к работе с массивами данных, содержащих пропущенные значения.

Первый подход, наиболее простой в реализации, – это удаление экземпляров, содержащих пропущенные значения, из массива и работа только с полными данными [4]. Использование данного подхода выглядит целесообразным, если пропуски данных носят единичный характер. Но даже в этом случае имеется серьезная опасность при удалении данных «потерять» важные закономерности. В том же случае, когда количество пропусков велико, удаление соответствующих экземпляров может привести к дефициту данных и даже невозможности дальнейшей обработки.

Вторым подходом является использование специальных модификаций методов обработки данных, допускающих наличие пропусков в массиве. В [5] приведен ряд модификаций методов классификации и кластеризации для работы с данными, содержащими пропущенные значения.

И, наконец, третьим подходом, наиболее распространенным, является использование методов оценки значений пропущенных элементов. Данные методы помогают заполнить пропуски в массивах, основываясь на некоторых предположениях о значении отсутствующих данных.

Принципиальная применимость и эффективность того или иного подхода зависит от количества пропусков в данных и причин, по которым они образовались. С точки зрения природы возникновения данных традиционно выделяют три категории пропусков [6].

1. Случайный пропуск. Факт появления пропуска в массиве не зависит ни от самого пропущенного значения, ни от значений других атрибутов. Пропуски случайны, носят единичный характер и связаны, как правило, с потерями при вводе, хранении или передаче данных. Очень важно понимать, что соответствующая информация на самом деле существует, но она по каким-то причинам отсутствует в массиве. В этом случае вполне эффективными оказываются как второй, так и третий подходы. В случае, когда число пропусков невелико, возможно использование и первого подхода.

2. Как бы случайный пропуск. Как и в первом случае, отсутствующие данные существуют. Основным отличием является то, что в появлении соответствующих пропусков наблюдаются закономерности. Факт появления такого пропуска, как правило, зависит от значений одного или нескольких других атрибутов. На практике такие пропуски возникают по причине сложности процессов измерения показателей и, как следствие, нерегулярности или меньшей частоты измерений, в случае систематических сбоях при вводе, хранении и передаче информации от какой-либо части изучаемой системы, например, удаленного производственного цеха или отдельной территории.

Поскольку пропуски в данных носят систематический характер, их удаление из массива может привести к потере важных зависимостей, поэтому в данном случае неприменим первый подход. Также открытым остается вопрос о применимости второго подхода. Наиболее эффективным является использование методов восстановления пропущенных данных.

3. Неслучайный пропуск. Значение пропущенного элемента не существует. Появление подобного пропуска в данных может зависеть от самого атрибута, от других пропусков в массиве, а также от значений других атрибутов. Факт появления может быть связан с наличием в выборке взаимоисключающих показателей либо показателей, которые измеряются только для отдельных групп экземпляров. Например, для разных типов объектов в технических и социальных

системах. Для работы с пропусками данного типа неприменимы методы восстановления, единственным допустимым подходом является проведение анализа предметной области и принятие решения на основе полученных выводов.

Методы восстановления пропусков в массивах данных

В настоящее время существует множество различных методов, отличающихся своей вычислительной сложностью, универсальностью и точностью работы.

Наиболее простыми являются метод подстановки среднего значения атрибута, вычисленного по всем известным значениям [4], и метод ближайших соседей [7]. Широкое распространение получили регрессионные методы [4, 8], локальные алгоритмы [9] и методы максимального правдоподобия [4].

Особого внимания заслуживают нелинейные методы, использующие искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы и методы нечеткой логики. Среди них можно выделить алгоритмы, осуществляющие непосредственное предсказание пропущенного значения [10], и алгоритмы, основанные на минимизации ошибки работы системы [11].

В [12] представлен сравнительный анализ эффективности ряда методов на различных массивах данных. В ходе проведенного анализа было замечено, что эффективность работы методов существенно варьируется не только на разных массивах, но и для одно-

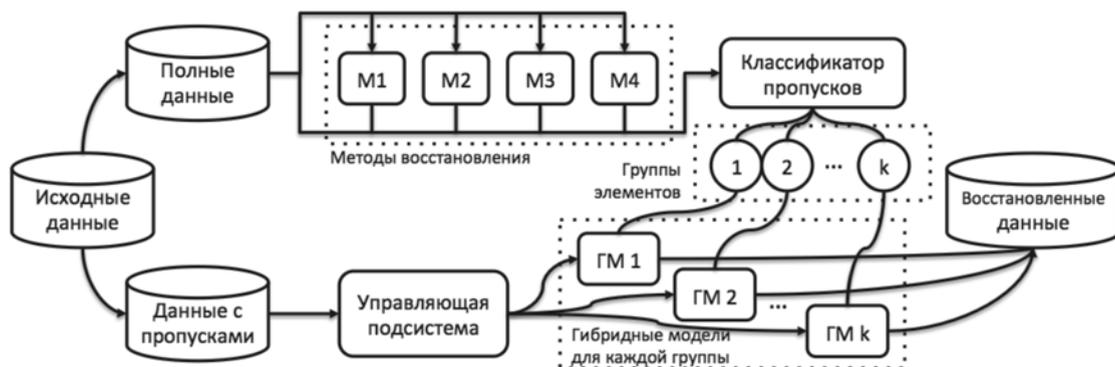
го массива на разных пропусках. В связи с этим возникла идея создания гибридного метода, который смог бы объединить сильные стороны каждого из методов.

Гибридный адаптивный метод с нейро-нечетким управлением. Предлагаемый метод включает в себя два этапа: построение гибридной системы и восстановление пропущенных значений. На рисунке представлена общая схема предлагаемого метода.

Как видно на рисунке, гибридная система состоит из набора гибридных моделей и управляющей подсистемы, которая принимает решение о выборе модели для каждого поступающего на вход вектора данных. Для создания гибридной модели были отобраны четыре метода: метод подстановки среднего значения [4] (M1), метод ближайших соседей [7] (M2), двухшаговый ем-алгоритм [4] (M3), метод, основанный на использовании авто-ассоциативных систем [11] (M4).

При построении гибридной системы используется часть массива, содержащая только полные данные. Случайным образом оттуда удаляется некоторое количество элементов, и полученные пропуски восстанавливаются с применением всех методов, используемых в гибридной системе. Сравнивая полученные результаты с исходным значением, получаем погрешности работы каждого из методов на каждом исключенном значении.

Используя один из методов кластеризации на множестве векторов, содержащих ошибки, получаем разделение экземпляров с удаленными значениями на кластера —



Общая схема гибридного адаптивного метода с нейро-нечетким управлением

группы элементов. Наиболее перспективным на этом шаге видится использование метода нечеткой кластеризации [14].

Для каждой из групп значений строится собственная гибридная модель. Интерпретация результатов кластерного анализа позволяет получить оценку того, какие из методов целесообразно использовать в каждой конкретной модели. В зависимости от результатов анализа при построении модели мы можем использовать один из методов, несколько или весь набор методов. В случае использования более одного метода, в качестве инструмента гибридизации применяем линейные взвешенные модели, либо многослойные нейронные сети прямого распространения сигнала.

На последнем этапе мы настраиваем управляющую подсистему, которая, получая на вход вектор из массива данных, должна дать оценку того, какую из гибридных моделей необходимо использовать для данного вектора. В качестве инструмента для построения управляющей подсистемы предлагается использовать модифицированную систему нейро-нечеткого вывода, способную работать с векторами, содержащими пропуски [5].

Такой подход позволяет использовать преимущества отдельных методов, преодолевая некоторые недостатки других, и тем самым получить более мощный интеллектуальный анализатор.

Тестирование методов. Для тестирования методов использовалась часть данных, не используемая при построении гибридной модели, из которой случайным образом удалялось некоторое количество элементов. Затем с использованием различных мето-

дов восстановления получали оценку пропущенного значения. Полученные оценки сравнивались с исходным значением и вычислялись следующие параметры: точность – доля пропущенных значений, предсказанных с ошибкой, меньшей 20 %, и погрешность – средняя квадратичная ошибка предсказания.

Тестирование методов проводилось на двух массивах данных.

Массив 1. Выборка значений технологических показателей работы алюминиевой электролизной ванны. Число атрибутов – 10, число экземпляров – 1092.

Массив 2. Выборка значений показателей социально-экономического развития городов и муниципальных районов Красноярского края за период 2005–2009 гг. Число атрибутов – 26, число экземпляров – 250.

В табл. 1 представлены результаты тестирования гибридного метода и четырех методов, используемых в гибридной системе. Как мы видим, для обоих массивов гибридный метод дает более точную оценку пропущенных значений.

Влияние пропусков на эффективность численных моделей

Для оценки влияния пропусков на эффективность работы численных моделей использованы исходные данные и результаты исследований, представленных в [1–3]. Исходные массивы данных, содержащие пропущенные значения, обрабатывались с помощью гибридного адаптивного метода и затем использовались для обучения и настройки моделей, аналогичных построенным в оригинальных исследованиях. Сравнение показателей работы оригинальных

Таблица 1

Результаты тестирования гибридного и оригинальных методов

Методы	Массив 1, %		Массив 2, %	
	точность	погрешность	точность	погрешность
1	33,5	39,3	42,2	27,8
2	73,5	18,1	68,2	21,1
3	68,8	24,8	69,6	18,8
4	59,5	23,1	66,0	20,0
Гибридный метод	90,7	14,7	85,8	16,0



моделей и моделей, построенных на восстановленных данных, дает возможность оценить степень влияния пропусков на эффективность работы моделей.

Аппроксимационная модель технологического параметра в процессе производства алюминия. Промышленная электролизная ванна для производства алюминия (электролизер) состоит из угольных анодов, погруженных в расплавленный электролит, в котором растворен глинозем. Слой расплавленного электролита расположен над расплавом алюминия.

В процессе электролиза в ванне на поверхности раздела алюминия и электролита могут возникать волны. Образование таких волн приводит к переносу металла в область электролита и снижает экономические показатели работы электролизера. При некоторых условиях наблюдается рост амплитуд таких волн, что называется неустойчивостью работы электролизера. В результате колебаний раздела происходят изменения напряжения на ванне. Количественной характеристикой таких изменений является технологический параметр «уровень шума», измеряемый в вольтгах.

В рамках проводимого исследования [1] решалась задача изучения зависимости параметра «уровень шума» от других технологических параметров. Были спроектированы и построены аппроксимационные модели на основе искусственных нейронных сетей прямого распространения сигнала, которые на основе значений 18 технологических параметров вычисляли значение параметра «уровень шума». Отметим, что при обуче-

нии моделей из массивов данных исключались экземпляры, содержащие одно или более пропущенных значений.

В данной работе мы использовали тот же подход к построению моделей и те же массивы данных, пропущенные элементы в которых были восстановлены с помощью гибридного адаптивного метода с нейронечетким управлением.

В табл. 2 приведено сравнение точности двух моделей, построенных ранее, с их эквивалентами, построенными сейчас на полных массивах данных. Отметим, что при использовании массивов с заполненными пропусками мы наблюдаем повышение числа примеров тестовой выборки, вычисленных с заданной точностью, а также заметное снижение величины максимальной погрешности как для первой, так и для второй модели. Что касается средней ошибки по всей тестовой выборке, то здесь также наблюдается снижение, но не настолько значительное.

Классификационная модель при изучении влияния различных факторов на показатели детской смертности. Детская смертность является важнейшей группой показателей, во многом определяющих демографическую ситуацию в стране. Правильный и своевременный анализ детской смертности позволяет разработать ряд конкретных мер по снижению заболеваемости и смертности, оценить эффективность проведенных ранее мероприятий, в значительной мере охарактеризовать работу местных органов здравоохранения по охране материнства и детства.

Таблица 2

Основные показатели работы аппроксимационных моделей, построенных на оригинальных и восстановленных данных

Ошибки	Модель 1, %		Модель 2, %	
	оригинальная	новая	оригинальная	новая
Средняя ошибка	8,24	7,96	4,23	4,19
Максимальная ошибка	45,46	21,63	41,32	29,59
Доля значений, вычисленных с ошибкой не более 10 %	88,75	93,17	95,46	97,52
Доля значений, вычисленных с ошибкой не более 5 %	74,31	80,37	83,20	87,73

Таблица 3

Основные показатели работы классификационных моделей, построенных на оригинальных и восстановленных данных

Возрастная категория	Количество правильно классифицированных объектов, %		
	исходные модели	модели на этапе 1	модели на этапе 2
До года	75,22	76,99	80,23
От 1 до 14 лет	81,31	81,51	83,48
От 15 до 19 лет	83,48	83,97	88,79

В рамках проводимых исследований [2, 3] был поставлен и решен ряд задач: анализ структуры показателей смертности детей в городских округах и муниципальных районах Красноярского края за 2006–2009 гг., выделение групп территорий со схожей структурой показателей; изучение зависимости показателей детской смертности от показателей социально-экономического развития территории.

Для проведения исследований использовались массив данных по показателям детской смертности, включающий данные более чем по 250 причинам смерти для каждой из групп возрастов (до года, 1–4 года, 5–9 лет, 10–14, 15–19 лет), а также массив данных, включающий результаты измерений 26 показателей социально-экономического развития, относящихся к различным сферам. Перечень показателей получен в результате экспертного опроса.

В ходе исследования были выделены три группы возрастов, различающиеся по структуре показателей смертности (до года, от 1 до 14 лет, от 14 до 19 лет), для каждой из возрастных групп определены наиболее существенные причины детской смертности (пять – для первой группы, семь – для второй и четыре – для третьей), все территории разбиты на группы со сходной картиной значений основных показателей детской смертности (шесть групп для возраста до 1 года, шесть для возраста от 1 до 14 лет, семь для возраста от 15 до 19 лет).

Для каждой из групп возрастов были построены классификационные модели, позволяющие по набору значений показателей социально-экономического развития территории определить, к какой группе от-

носится данная территория. При построении оригинальных моделей все неполные экземпляры удалялись из массива и построение осуществлялось только на полных данных.

Оценка степени влияния пропусков в данных на точность работы этих моделей проходила в два этапа. На первом этапе были получены оценки и заполнены пропуски в первом массиве (показатели детской смертности), после чего снова выполнили все действия по построению и настройки модели. На втором этапе были получены оценки и заполнены еще и пропуски в массиве, содержащем значения показателей социально-экономического развития. Сравнение точности работы оригинальных моделей, моделей, построенных на этапах 1 и 2, приведены в табл. 3.

Заметим, что при использовании заполненного массива данных, содержащего показатели детской смертности, мы наблюдали лишь незначительное повышение качества классификационной модели (от 0,5 до 1,5 %). Это может быть связано как с незначительным количеством пропусков (около 8 % экземпляров), так и со случайным характером этих пропусков.

На втором этапе при использовании заполненного массива данных, содержащих показатели социально-экономического развития, мы наблюдали более серьезный рост точности работы модели. Это говорит о том, что данные пропуски являются существенными в контексте поставленной задачи.

Проведенное исследование показало применимость методов восстановления пропусков в массивах данных и, в частности, гибридного адаптационного метода



для заполнения пропущенных значений в массивах данных, содержащих информацию о процессах, происходящих в сложных динамических системах.

Кроме того, в ходе исследования получено экспериментальное подтверждение

негативного влияния пропусков в данных на эффективность работы моделей, а также продемонстрированы возможности методов восстановления пропусков в массивах данных при численном моделировании сложных динамических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлов И.А., Проворова О.Г. Новый подход к исследованию устойчивости алюминиевого электролизера // Вестник Красноярского гос. ун-та. Физико-математические науки. – 2002. – № 1. – С. 116–120.

2. Карлов И.А. Исследование структуры показателей детской смертности в городских округах и муниципальных районах Красноярского края // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных: Матер. XIX Всеросс. семинара. – 2011. – С. 66–72.

3. Карлов И.А. Анализ показателей детской смертности в городских округах и муниципальных районах Красноярского края с использованием искусственных нейронных сетей и методов нечеткой логики // Всеросс. конф. Математическое моделирование и информационно-вычислительные технологии в междисциплинарных научных исследованиях. – 2011. – С. 64–65.

4. Литтл Р.Дж.А., Рубин Д.Б. Статистический анализ данных с пропусками. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 336 с.

5. Garcia-Laencina P.J., Sanco-Gomez J.-L., Figueiras-Vidal A.R. Pattern classification with missing data: a review. – London: Springer-Verlag Limited, 2009.

6. Schafer J.L., Graham J.W. Missing data: Our view to the state of the art // Psychological methods. – 2002. – Vol.7. – № 2. – С.147–177.

7. Zloba E., Yatskiv I. Statistical methods for estimating missing data // Computer Modeling and New Technologies. – 2002. – № 6(1).

– P. 51–61.

8. Россиев А.А. Моделирование данных при помощи кривых для восстановления пробелов в таблицах // Методы нейроинформатики: сб. научн. тр.; под ред. Горбаня А.Н. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 1998. – С. 6–22.

9. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999.

10. Gupta A., Lam M.S. Estimation Missing Values using Neural Networks // J. of Operational Research Society. – 1996. – Vol. 47. – № 2. – С. 229–239.

11. Nelwamondo F.V., Mohamed S., Marwala T. Missing Data: A comparison of neural network and expectation maximization techniques // Current Science. – 2007. – Vol. 93. – № 11. – С.1467–1473.

12. Карлов И.А. Методы восстановления пропущенных значений с использованием инструментария Data Mining // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 7(40) – С.29–33.

13. Карлов И.А., Кошур В.Д. Подходы к построению гибридной модели для оценки значений пропущенных элементов в массивах данных // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных: Матер. XX Всеросс. семинара. – 2012. – С. 174–179.

14. Halkidi M., Batistakis Y., Vazirgiannis M. On Clustering Validation Techniques // J. of Intelligent Information Systems. – 2003. – № 17:2/3. – С.107–145.

REFERENCES

1. Karlov I.A., Provorova O.G. Noviy podhod k issledovaniyu ustoychivosti aluminiyevogo elektrolizera / Vestnik Krasnoyarskogo gos. un-ta. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2002. – № 1. – S. 116–120. (rus)

2. Karlov I.A. Issledovanie struktury pokazateley detskoy smertnosti b gorodskih okrugah i municipalnyh raionov Krasnoyarskogo kraya / Neiroinformatika, ee prilogeniya i analiz dannyh: mater. XX Vseross. seminar. – 2011. – S. 66–72. (rus)

3. Karlov I.A. Analiz pokazatelej detskoy smertnosti v gorodskih okrugah i municipal'nyh rajonah

Krasnojarskogo kraja s ispol'zovaniem iskusstvennyh nejronnyh setej i metodov nechetkoj logiki / Vseross. konf. Matematicheskoe modelirovanie i informacionno-vychislitel'nye tehnologii v mezhdisciplinarnykh nauchnykh issledovaniyah. – 2011. – S. 64–65. (rus)

4. Little R.J.A., Rubin D.B. Statisticheskij analiz dannyh s propuskami. – Moscow: Finansy i statistika, 1991. – 336 s. (rus)

5. Garcia-Laencina P.J., Sanco-Gomez J.-L., Figueiras-Vidal A.R. Pattern classification with missing data: a review. – London: Springer-Verlag

Limited, 2009.

6. **Schafer J.L., Graham J.W.** Missing data: Our view to the state of the art / Psychological methods. – 2002. – Vol. 7. – № 2. – P. 147–177.

7. **Zloba E., Yatskiv I.** Statistical methods for estimating missing data / Computer Modeling and New Technologies. – 2002. – № 6(1). – P. 51–61.

8. **Rossiev A.A.** Modelirovanie dannyh pri pomoshhi krivyh dlja vosstanovlenija probelov v tablitsah / Metody nejroinformatiki: sb. nauchn. tr.; pod red. Gorbanja A.N. – Krasnojarsk: Izd-vo KGTU, 1998. – S. 6–22. (rus)

9. **Zagoruiko N.G.** Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy. – Novosibirsk: Izd-vo In-ta matematiki, 1999. (rus)

10. **Gupta A., Lam M.S.** Estimation Missing Values using Neural Networks / J. of Operational Research Society. – 1996. – Vol. 47. – № 2.

– P. 229–239.

11. **Nelwamondo F.V., Mohamed S., Marwala T.** Missing Data: A comparison of neural network and expectation maximization techniques / Current Science. – 2007. – Vol. 93. – № 11. – P. 1467–1473.

12. **Karlov I.A.** Metody vosstanovlenija propushhennyh znachenij s ispol'zovaniem instrumentarija Data Mining. / Vestnik Sibirskogo gos. ajerokosmicheskogo un-ta im. akademika M.F. Reshetneva. – 2011. – № 7(40). – S. 29–33. (rus)

13. **Karlov I.A., Koshur V.D.** Podhody k postroeniju gibridnoj modeli dlja ocenki znachenij propushhennyh jelementov v massivah dannyh / Nejroinformatika, ee prilozhenija i analiz dannyh: Mater. XX Vseross. seminar. – 2012. – S. 174–179. (rus)

14. **Halkidi M., Batistakis Y., Vazirgiannis M.** On Clustering Validation Techniques / J. of Intelligent Information Systems. – 2003. – № 17:2/3. – P. 107–145.

КАРЛОВ Иван Александрович – заместитель руководителя информационно-телекоммуникационного комплекса Сибирского федерального университета, докторант кафедры вычислительной техники Института космических и информационных технологий СФУ, кандидат технических наук.

660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79.

E-mail: IAKarlov@sfu-kras.ru

KARLOV, Ivan A. *Siberian Federal University.*

660041, Svobodny Pr. 79, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: IAKarlov@sfu-kras.ru



УДК 004.438

А.А. Акишин

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА MATLAB-SIMULINK ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ КОМПЛЕКСЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.А. Akishin

MATLAB-SIMULINK APPLICATION TO MODELLING THE MECHANICAL VIBRATION USING REAL-TIME SOFTWARE AND HARDWARE

Рассмотрена задача моделирования механических колебаний железнодорожного подвижного состава в пакете MatLab-Simulink и использование для расчетов программно-аппаратного комплекса реального времени.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ; MATLAB-SIMULINK; МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.

This article deals with the problem of modelling the mechanical vibrations of rail vehicles in MatLab-Simulink and calculations using real-time software and hardware.

REAL-TIME SOFTWARE AND HARDWARE; MATLAB-SIMULINK; MECHANICAL VIBRATIONS.

Программно-аппаратный комплекс (ПАК), разработанный на кафедре электрической тяги Московского государственного университета путей сообщения, помимо расчета электромагнитных процессов позволяет исследовать в реальном времени и механические процессы колебаний рельсовых экипажей. Эта возможность обусловлена тем, что в программном пакете MatLab-Simulink, применяемом при программировании задач для ПАК, имеются блоки операционных усилителей, позволяющие составлять программы решения дифференциальных уравнений механических колебаний так же, как это ранее выполнялось на аналоговых вычислительных машинах в виде структурных блок-схем. Но при этом решение уравнений будет выполняться цифровым способом, а использование ПАК позволяет быстрее реализовать процесс такого решения.

Для примера составим в пакете MatLab-Simulink программу моделирования свободных механических колебаний упрощенной двухмассовой модели рельсового экипажа (рис. 1).

Колебания этой модели описываются системой двух уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + (\beta_1 + \beta_2) \dot{z}_1 + (ж_1 + ж_2) z_1 - \\ - \beta_2 \dot{z}_2 - ж_2 z_2 = 0 \\ -\beta_2 \dot{z}_1 - ж_2 z_1 + m_2 \ddot{z}_2 + \beta_2 \dot{z}_2 + ж_2 z_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Преобразуем данную систему к виду:

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = \frac{1}{m_1} (-(\beta_1 + \beta_2) \dot{z}_1 - (ж_1 + ж_2) z_1 + \\ + \beta_2 \dot{z}_2 + ж_2 z_2) \\ \ddot{z}_2 = \frac{1}{m_2} (\beta_2 \dot{z}_1 + ж_2 z_1 - \beta_2 \dot{z}_2 - ж_2 z_2) \end{cases} \quad (2)$$

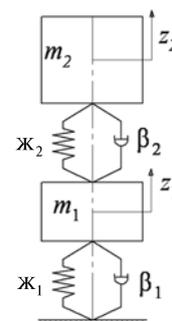


Рис. 1. Общий вид двухмассовой модели

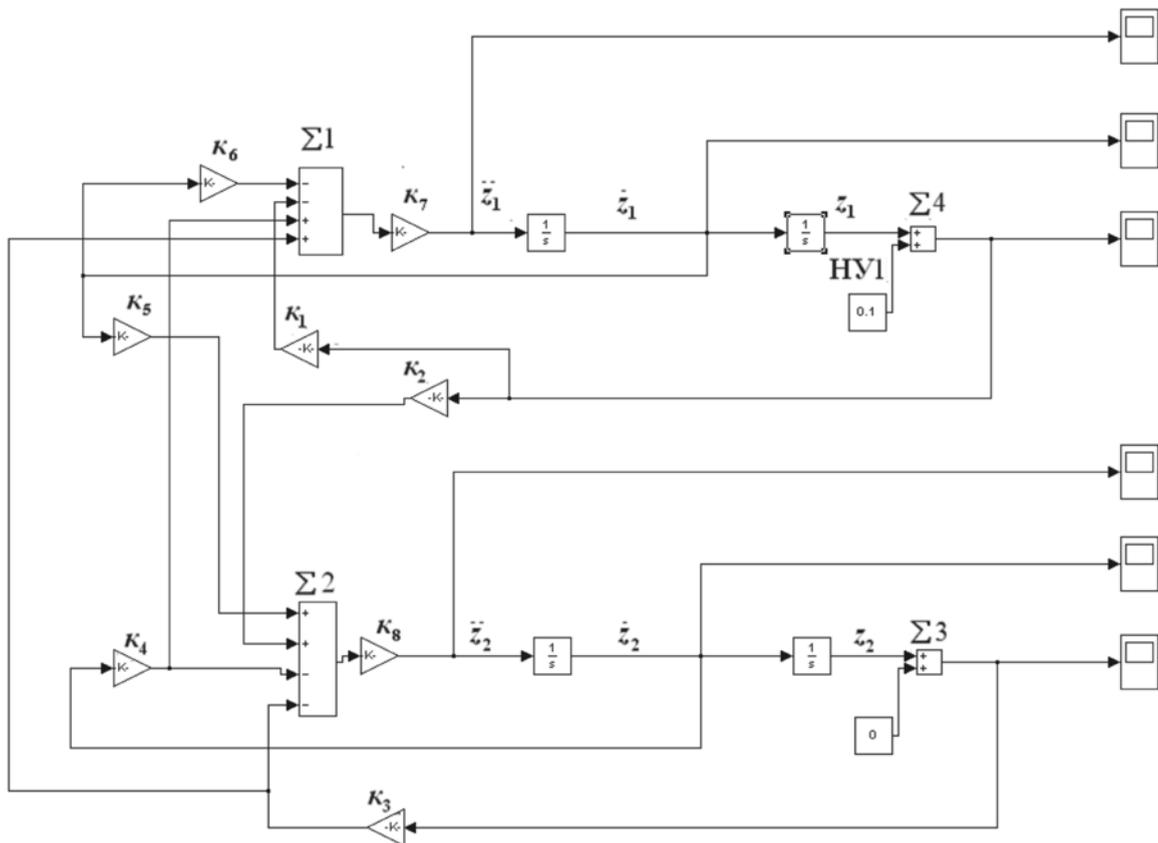


Рис. 2. Структурная блок-схема решения уравнений (2) в пакете MatLab-Simulink

Программа решения данной системы уравнений в пакете MatLab-Simulink (рис. 2) суммирует все силы, стоящие в правой части второго уравнения системы (2) в сумматорах $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$. На вход этих сумматоров поступают координаты z_1 и z_2 , а также скорости \dot{z}_1 и \dot{z}_2 с выхода соответствующих операционных усилителей $\frac{1}{s}$ (в обозначениях пакета MatLab-Simulink) [1]. Эти координаты и скорости в усилительных элементах $\kappa_1 \div \kappa_6$ умножаются на соответствующие множители $\beta_2, \beta_1 + \beta_2$, а также κ_2 и $\kappa_1 + \kappa_2$. Сигналы с выхода $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$ делятся на соответствующие значения масс m_1 и m_2 в усилителях κ_7 и κ_8 . На выходе этих усилителей получают значения сигналов, соответствующие правым частям уравнений системы (2), т. е. равные ускорениям \ddot{z}_1 и \ddot{z}_2 . Интегрирование этих производных в операционных усилителях позволяет получить сигналы скоростей \dot{z}_i и перемещений z_i . Структурная блок-схема решения

(рис. 2) отличается большей наглядностью и упрощает процедуру отладки программ.

Примем начальные условия для исследования свободных колебаний следующими: $\dot{z}_i = 0$, $z_2 = 0$ и $z_1 = 0,1$ м. Эти начальные условия можно задать через блоки НУ1 и НУ2. При задании начальных условий возникают свободные колебания системы.

Графики полученных свободных колебаний и их амплитудные спектры Фурье, вычисленные с помощью алгоритма «быстрого преобразования Фурье» (БПФ) [2], имеющегося в составе пакета MatLab, приведены на рис. 3 и 4.

Как видно из этих рисунков, свободные колебания имеют затухающий характер, что обусловлено наличием гидравлических гасителей колебаний в исследуемой модели (см. рис. 1). В амплитудном спектре имеются два ярко выраженных максимума, первый максимум приходится на частоту свободных колебаний второй массы $f_{св2} = 1,2$ Гц, а второй максимум – на ча-

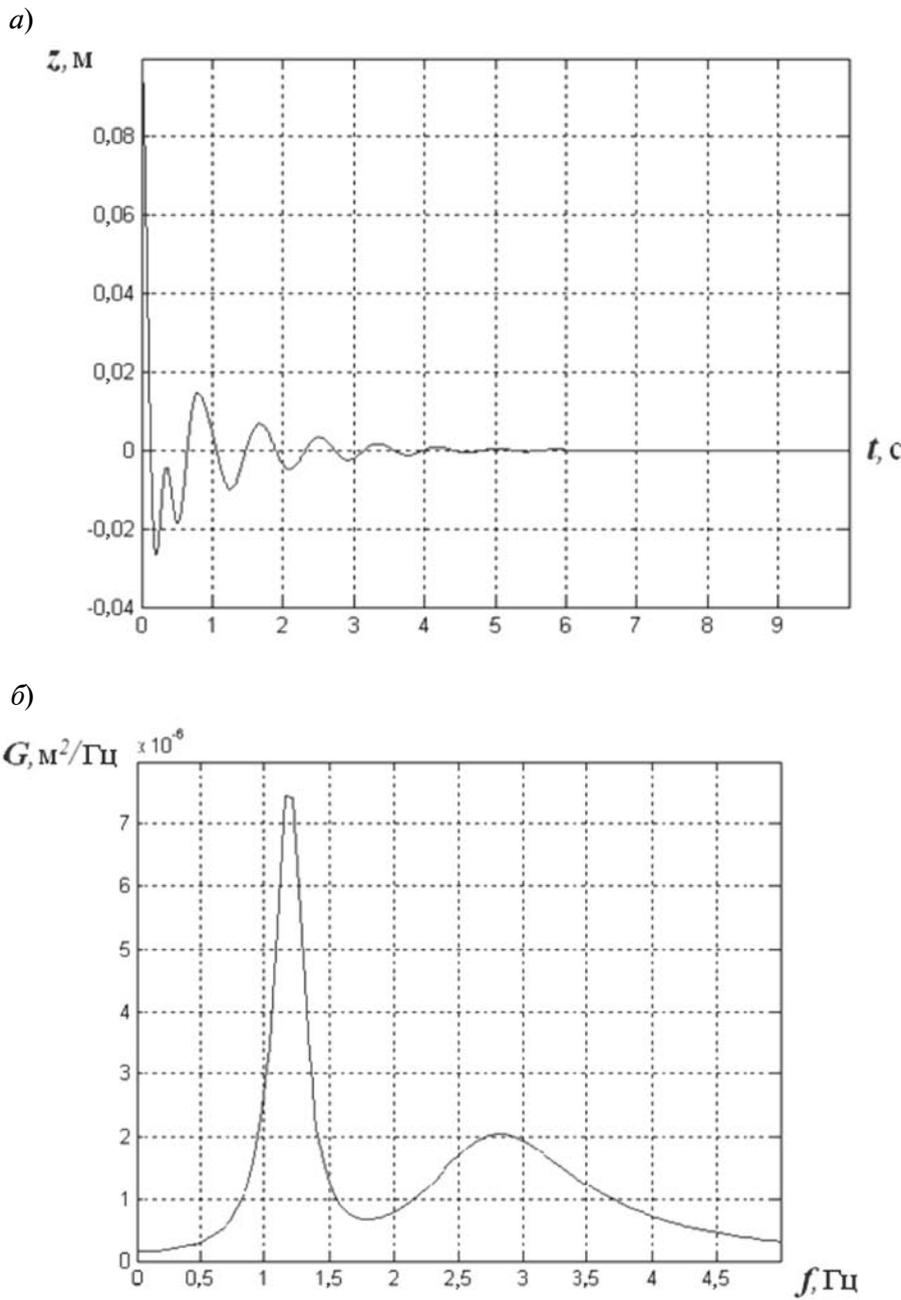


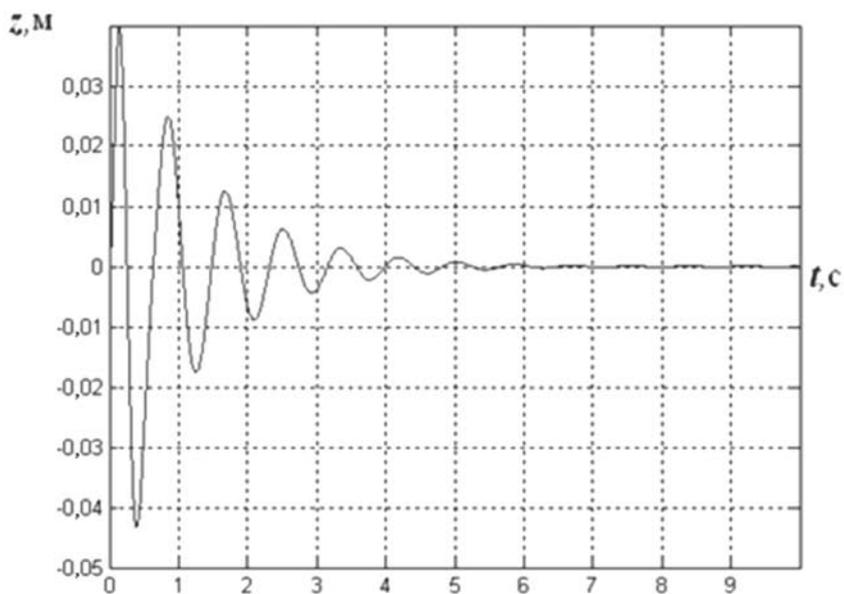
Рис. 3. Реализация процесса свободных колебаний первой массы (а) и его амплитудный спектр (б)

стоту свободных колебаний первой массы $f_{св1} = 2,7$ Гц. При этом амплитуда колебаний второй массы с частотой $f_{св1}$ значительно меньше, чем с частотой $f_{св2}$. Эти результаты практически совпадают с данными, приведенными в [3–5].

Аналогичным образом можно разрабатывать программы исследования колебаний более сложных моделей рельсовых экипажей.

Большие преимущества будут получены при использовании ПАК для исследования вынужденных колебаний при случайных процессах возмущений в виде неровностей рельсового пути длительностью 30 с [6]. Время расчета случайных колебаний системы на персональном компьютере составляет 5,5 ч. Применение ПАК позволяет уменьшить это время до 30 с, т. е.

а)



б)

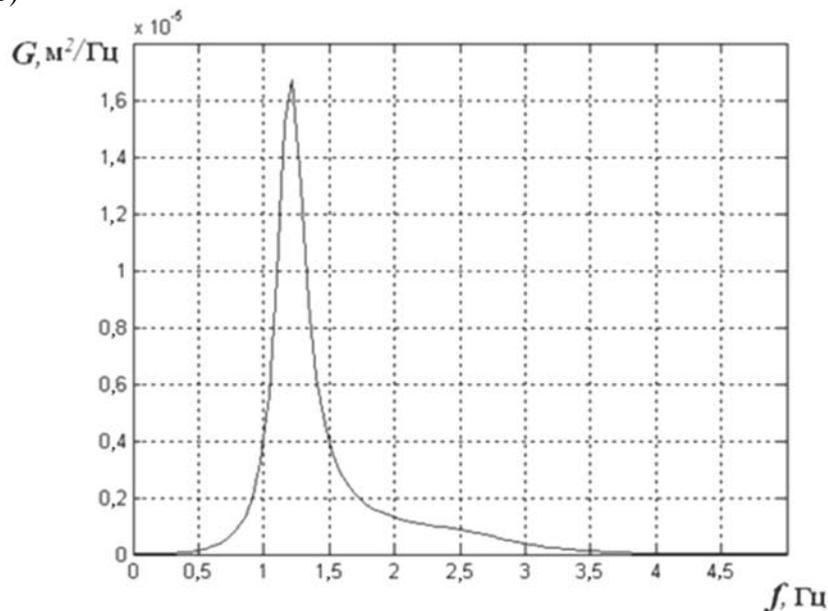


Рис. 4. Реализация процесса свободных колебаний второй массы (а) и его амплитудный спектр (б)

до длительности задаваемого процесса возмущения. Таким образом, время вычисления ускоряется в 660 раз.

Применение пакета MatLab-Simulink для программирования колебаний механических систем позволяет выполнять про-

граммирование в виде составления структурных блок-схем, использование которых упрощает процедуру отладки программ.

Использование данного пакета дает возможность выполнять исследование механических колебаний на ПАК реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяконов В.П.** D93 MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН Пресс, 2005. – 800 с.
2. **Дженкинс Г.М., Ваттс Д.Г.** Спектральный анализ и его применение. – М.: Мир, 1971.
3. **Бирюков И.В., Савоськин А.Н., Бурчак Г.П. и др.** Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп.; Под ред. Бирюкова И.В. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
4. **Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава // Юбилейный сб. науч. тр. – М.: МИИТ, 1997. – Вып. 912. – 103 с.**
5. **Гарг В.К., Дуккипати Р.В.** Динамика подвижного состава: Пер. с англ. / Под. ред. Н.А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.
6. **Савоськин А.Н., Кочергин В.В., Поляков А.И.** Вертикальные и горизонтальные возмущения на рельсовом полотне // Мир транспорта. – 2005. – № 4.
7. **Бендат Дж., Пирсол А.** Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1977. – 464с.

REFERENCES

1. **D'iakonov V.P.** D93 MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Osnovy primeneniia / Ser. Biblioteka professionala. – Moscow: SOLON Press, 2005. – 800 s. (rus)
2. **Dzhenkins G.M., Vatts D.G.** Spektral'nyi analiz i ego primeneniie. – Moscow: Mir, 1971. (rus)
3. **Biriukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P. i dr.** Mekhanicheskaiia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava: uchebnik dlia vuzov zh.-d. transp; Pod red. Biriukova I.V. – Moscow: Transport, 1992. – 440 s. (rus)
4. **Fundamental'nye problemy dinamiki i prochnosti podvizhnogo sostava / Iubileinyi sb. nauch. tr. – Moscow: Izd-vo MIIT, 1997. – Vyp. 912. – 103 s. (rus)**
5. **Garg V.K., Dukkupati R.V.** Dinamika podvizhnogo sostava: per. s angl.; Pod. red. Pan'kina N.A. – Moscow: Transport, 1988. – 391 s. (rus)
6. **Savos'kin A.N., Kochergin V.V., Poliakov A.I.** Vertikal'nye i gorizon-tal'nye vozmushcheniia na rel'sovom polotne / Mir transporta. – 2005. – № 4. (rus)
7. **Bendat Dzh., Pirsol A.** Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov. – Moscow: Mir, 1974. – 464 s. (rus)

АКИШИН Александр Александрович – аспирант кафедры электрической тяги Института транспортной техники и систем управления Московского государственного университета путей сообщения. 127994, Россия, Москва, ул. Образцова, д. 9.
E-mail: Elmechtrans@mail.ru

AKISHIN, Alexandr A. Moscow State University of Railway Engineering. 127994, Obraztsova Str. 9, Moscow, Russia.
E-mail: elmechtrans@mail.ru

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 6 (186) 2013

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

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

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 26.12.2013. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,67. Уч.-изд. л. 17,67. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Отпечатано в типографии Издательства Политехнического университета:
Россия, 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 **MythType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – **TNR**, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация 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