

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

6(210) 2014

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2014

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

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

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



**ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL**

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

6(210) 2014

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2014

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

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

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

Members:

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

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

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

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

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

Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Subscription index **47517** in the «Press of Russia» Joint Catalogue.

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database

© Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

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

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

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

© St. Petersburg State Polytechnical University, 2014

Содержание

Инфокоммуникационные технологии в образовании

Райчук Д.Ю., Самочадин А.В., Носницын С.М., Хмельков И.А. <i>Комплекс мобильных средств поддержки учебного процесса</i>	7
Ермаков А.В. <i>Повышение эффективности работы университета за счет создания информационно-телекоммуникационной системы</i>	16
Райчук Д.Ю., Самочадин А.В., Тимофеев Д.А., Лукин А.А., Хмельков И.А. <i>Средства автоматизированной регистрации участников мероприятий</i>	24
Самочадин А.В., Сужаев О.И., Тимофеев Д.А., Рогов П.А. <i>Инструментальные средства нагрузочного тестирования для систем централизованного управления мобильными устройствами</i>	33

Интеллектуальные системы и технологии

Хуршудов А.А., Марков В.Н. <i>Спонтанное выделение иерархии двумерных признаков для классификации изображений</i>	43
--	----

Системный анализ и управление

Бурдаков С.Ф., Сизов П.А. <i>Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования</i>	49
Ростов Н.В. <i>Синтез и многокритериальная оптимизация нелинейных квазиоптимальных по быстродействию цифровых регуляторов</i>	59
Марценюк М.А., Селетков И.П. <i>Приведение конечного нечеткого автомата к нечеткой комбинационной схеме с блоком памяти</i>	67

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Селиверстов Я.А., Стариченков А.Л. <i>Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды</i>	81
<i>Авторский указатель</i>	95

Contents

Information and Telecommunications Technologies in Education

Raychuk D.Yu., Samochadin A.V., Nosnitsyn S.M., Khmelkov I.A. <i>A Set of Mobile Applications to Support the Education Process</i>	7
Ermakov A.V. <i>Improving the Efficiency of the University Through the Creation of an Information-telecommunication System</i>	16
Raychuk D.Yu., Samochadin A.V., Timofeev D.A., Lukin A.A., Khmelkov I.A. <i>An Approach to Automated Attendance Checking of Events Participants</i>	24
Samochadin A.V., Suzhaev O.I., Timofeev D.A., Rogov P.A. <i>Tools for Load Testing Mobile Device Management Systems</i>	33

Intellectual Systems and Technologies


Khurshudov A.A., Markov V.N. <i>Unsupervised Learning of Hierarchical 2D Features for Image Classification</i>	43
---	----

System Analysis and Control

Burdakov S.F., Sizov P.A. <i>The Mobile Robot Motion Control Algorithms for the Pursuit Problem</i>	49
Rostov N.V. <i>Synthesis and Multiobjective Optimization of Nonlinear Quasi Time-Optimal Digital Controllers</i>	59
Martsenyuk M.A., Seletkov I.P. <i>Convesion of Fuzzy Finite Automata to Fuzzy Combinational Circuit</i>	67

Simulations of Computer, Telecommunications, Control, and Social Systems

Seliverstov Ya.A., Starichenkov A.L. <i>Construction of an Urban Traffic Control Model Under the Conditions of Information Uncertainty</i>	81
<i>Author Index</i>	95



Инфокоммуникационные технологии в образовании

УДК 004.7

Д.Ю. Райчук, А.В. Самочадин, С.М. Носницын, И.А. Хмельков

КОМПЛЕКС МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

D.Yu. Raychuk, A.V. Samochadin, S.M. Nosnitsyn, I.A. Khmelkov

A SET OF MOBILE APPLICATIONS TO SUPPORT THE EDUCATION PROCESS

Описана архитектура комплекса мобильных приложений для поддержки учебного процесса. В состав комплекса входят средства учета посещаемости, учета успеваемости, управления расписанием, интерактивного взаимодействия с аудиторией, поддержки итоговой аттестации, доступа к учебным материалам, управления индивидуальными заданиями.

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ; МОБИЛЬНЫЕ СЕРВИСЫ; УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС.

This paper describes a set of mobile applications that support the education process. The set includes applications for attendance monitoring, academic performance monitoring, schedule management, classroom interaction, final grading, education materials access and individual homework management. All these applications rely on the mobile device management (MDM) system. The MDM system provides a common authentication service and mobile software distribution. Applications use and modify the data from relevant corporate information systems. As each university has its own set of custom information systems, the MDM system also provides the common interface to these services. A set of applications is connected to the information system via an adapter program.

MOBILE DEVICE MANAGEMENT; MOBILE SERVICES; EDUCATION PROCESS.

Мировой опыт использования мобильных технологий в образовании [1–4] демонстрирует актуальность применения мобильных приложений для решения различных вопросов организации и управления образовательным процессом. Одним из основных направлений автоматизации образовательной деятельности является внедрение средств поддержки учебного процесса, к которым относятся средства поддержки как непосредственно образовательных активностей (лекций, практических и лабораторных занятий, курсовых работ, зачетов и экзаменов), так и учебного процесса в целом (расписание, учет успеваемости). Многие ведущие университеты мира широко используют некоторые из

этих средств (в основном, расписание и учет посещаемости) и отмечают высокую эффективность их применения [1–3]. Однако следует уточнить, что в большинстве случаев эти средства реализуются независимо и не позволяют использовать их для комплексной поддержки учебного процесса [2]. Мобильные средства поддержки обучения популярны также в ряде университетов развивающихся стран, где их использование считают одним из основных способов повышения уровня образования и проводят работы по их внедрению [4, 5].

Российские образовательные организации имеют пока очень ограниченный опыт использования мобильных технологий в учебном процессе [2], но исследования по-

казывают, что условия и заинтересованность в их внедрении есть. Опросы, проведенные в российских университетах [2, 6], демонстрируют готовность студентов и преподавателей к применению мобильных технологий в образовательной деятельности и востребованность основных мобильных средств поддержки учебного процесса.

Опрос, проведенный компанией IBS и ВЦИОМ в девяти федеральных университетах России [6] показал, что владельцами мобильных устройств с доступом в Интернет являются 95 % преподавателей и 99 % студентов. Практически все из них (98 % преподавателей и 100 % студентов) используют мобильные устройства на платформах Android, iOS, Windows Phone.

И преподаватели, и студенты готовы применять различные мобильные приложения в образовательных целях. При этом наибольшую востребованность (94 % преподавателей, 72 % студентов) имеют различные средства поддержки образовательного процесса и несколько меньшую (73 % студентов и 52 % преподавателей) – средства доступа к различным информационным ресурсам.

В результате более подробного опроса, проведенного в Санкт-Петербургском политехническом университете [2], в качестве наиболее востребованных были выделены сервисы оповещения об изменениях в расписании (97 %), мобильные сервисы поддержки проведения тестов и экзаменов (75 %), сервисы интерактивного взаимодействия студентов и преподавателей (68 %). Преподаватели отмечают необходимость в сервисах учета посещаемости и успеваемости.

Состав комплекса поддержки учебного процесса

Информация о востребованности функций мобильных приложений, полученная на основе опросов студентов и преподавателей российских университетов, и анализ сервисов, предлагаемых различными университетами мира, позволили выделить основные функции мобильных средств поддержки учебного процесса:

- получение информации о расписании, изменениях в расписании, о проводи-

мых мероприятиях и событиях;

- получение информации о правилах выполнения различных учебных процедур;
- обеспечение интерактивного взаимодействия между участниками учебного процесса;
- обеспечение проведения опросов, тестов, экзаменов;
- обеспечение распределения индивидуальных заданий между студентами;
- обеспечение контроля посещаемости;
- обеспечение контроля успеваемости.

Решить эти задачи с помощью набора независимых приложений невозможно, т. к. выполнение одних функций существенно зависит от результатов выполнения других. Так, учет посещаемости невозможен без оперативных данных о расписании со всеми изменениями в нем, оперативный учет успеваемости – без данных о посещаемости и результатах аттестации. При этом в зависимости от роли (преподаватель, студент, административный персонал) приложения должны предоставлять разные возможности по доступу к ресурсам и по функциональности.

Кроме того, согласно результатам опросов, использование средств поддержки учебного процесса должно проводиться с помощью собственных мобильных устройств преподавателей и студентов в соответствии с их правами доступа. Это накладывает дополнительные требования к обеспечению безопасного доступа к корпоративной информации и к ресурсам учебного заведения.

Таким образом, можно выделить основные нефункциональные требования к средствам поддержки учебного процесса.

- Необходим единый механизм доступа к информации, требуемой для работы.
- Доступ к информации должен безопасным образом осуществляться с мобильных устройств пользователей, при этом необходима поддержка основных мобильных платформ: Android, iOS, Windows Phone.
- Необходим контроль доступа пользователей к данным и приложениям. Должна присутствовать возможность настройки различных политик для паролей, которые могут накладывать ограничения на исполь-

зование приложений и ресурсов. Политики должны применяться к определенным группам, пользователям, устройствам.

- Должна быть реализована возможность дистанционного распространения и обновления приложений.

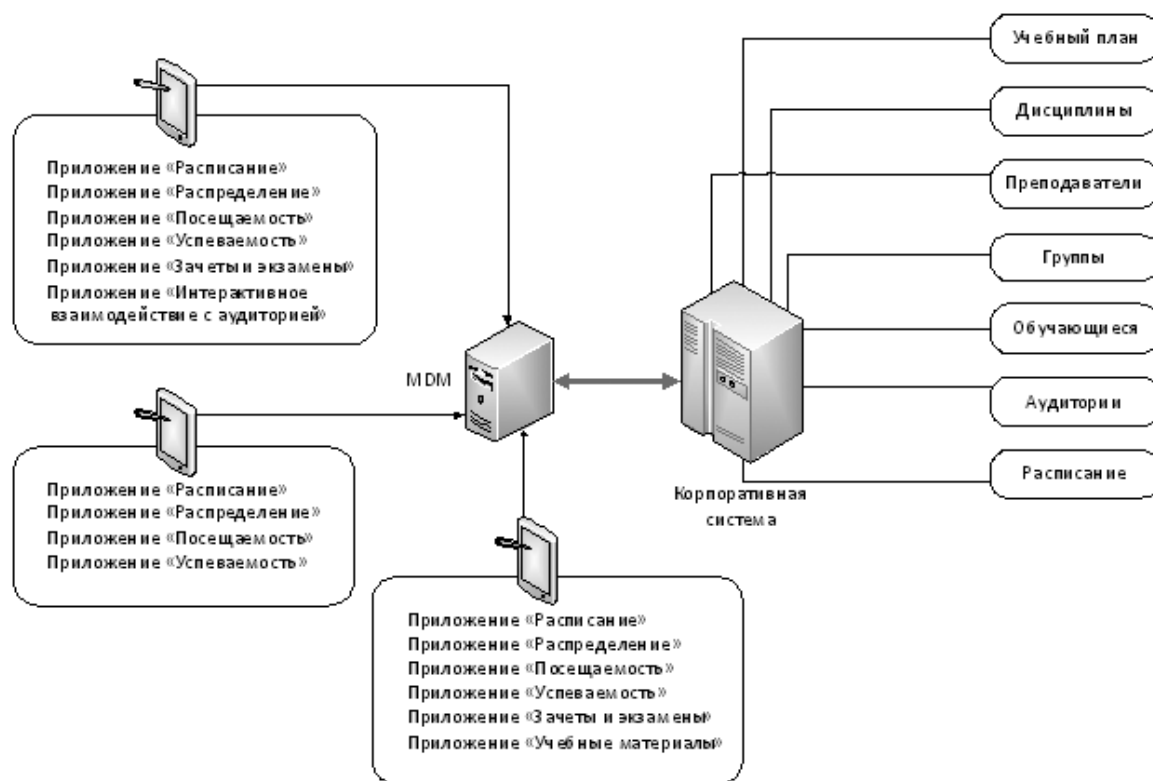
Одним из наиболее перспективных подходов для внедрения мобильных технологий [7], обеспечивающим безопасный доступ к корпоративным информационным ресурсам организации при использовании собственных устройств пользователей, является подход на основе средств централизованного управления мобильными устройствами (mobile device management – MDM), которые обеспечивают управление распространением программного обеспечения, политиками, безопасностью, предоставляемыми услугами [8].

Для решения перечисленных задач предлагается архитектура средств поддержки учебного процесса в виде комплекса мобильных приложений и средств обеспечения централизованного управления мобильными устройствами.

Архитектура комплекса поддержки учебного процесса

Средства поддержки учебного процесса включают в себя набор мобильных приложений для поддержки учебного процесса и средства централизованного управления мобильными устройствами. Архитектура комплекса представлена на рисунке.

Набор мобильных приложений обеспечивает удобный для пользователя интерфейс образовательных сервисов. Мобильные приложения в зависимости от решаемой ими задачи реализуются в виде кроссплатформенных web-приложений или специализированных программ для каждой мобильной платформы. Интерфейсы мобильных приложений должны учитывать малый размер экрана устройства и особенности взаимодействия с пользователем посредством сенсорного экрана. В связи с этим представляется целесообразным вместо одного или нескольких приложений, предоставляющих все функции системы, реализовать большее количество более простых специализированных приложений,



Архитектура системы поддержки учебного процесса

упрощающих решение конкретных задач. При этом разные приложения могут быть реализованы с помощью общих функций системы MDM.

Средства централизованного управления мобильными устройствами обеспечивают взаимодействие приложений с корпоративными системами образовательного учреждения, которые являются источниками необходимой для работы приложений информации. Эта информация формируется как средствами самих корпоративных систем, так и мобильными приложениями средств поддержки учебного процесса.

Для работы комплекса используются следующие данные из корпоративных систем.

- Учебный план: сведения о направлениях подготовки, набору дисциплин по каждому направлению, видах занятий и отчетности.

- Дисциплины: материалы к лекциям, практическим и лабораторным занятиям, курсовым работам; аттестационные материалы для проведения опросов, контрольных работ, тестов; зачетные и экзаменационные материалы.

- Преподаватели: общая информация о преподавателях; информация о занятиях, проводимых преподавателем по различным дисциплинам.

- Обучающиеся: общая информация о каждом студенте; данные о ходе выполнения студентом учебного плана, результатах аттестации и посещаемости.

- Группы: перечень академических групп и их состав.

- Аудитории: список аудиторий с информацией о местонахождении и доступном оборудовании.

- Расписание: информация о группах, дисциплинах, преподавателях, видах занятий, времени и месте их проведения.

Все эти данные могут храниться и обрабатываться как одной централизованной корпоративной системой, так и несколькими разными системами. Так, данные о преподавателях могут храниться в информационной системе отдела кадров, а данные о студентах и учебных группах — в информационной системе учебной части

образовательного учреждения. Если необходимо взаимодействие с несколькими различными информационными системами, то должен быть реализован общий интерфейс доступа к данным в этих системах. Возможность реализации средств доступа к данным базируется на открытом программном интерфейсе, предоставляемом MDM и позволяющем осуществлять реализацию плагинов для обмена информацией с различными информационными системами.

Доступ к корпоративной системе приложения осуществляют не напрямую, а путем запроса к соответствующему сервису MDM. Система MDM обеспечивает взаимодействие мобильных приложений с корпоративной системой и осуществляет необходимые для безопасной работы функции управления мобильными устройствами и приложениями. MDM позволяет автоматически развернуть все необходимые пользователю приложения на мобильном устройстве, при этом список приложений определяется в зависимости от принадлежности пользователя к группам. В качестве признаков, на основе которых формируется список приложений, могут выступать роль (преподаватель, студент), принадлежность к кафедре или академической группе и другие признаки, которые могут быть определены на основе данных корпоративной системы. MDM также позволяет проверять, подключено ли мобильное устройство пользователя к системе и, как следствие, получает ли пользователь необходимую для учебного процесса информацию.

Требуемые характеристики по надежности и отказоустойчивости комплекса (особенно при работе с большим количеством пользователей) обеспечиваются архитектурой MDM, предоставляющей возможности по резервированию частей системы и балансировки нагрузки.

Приложения, входящие в состав комплекса

Выделенные функциональные требования реализуются следующим набором приложений для поддержки учебного процесса: «Расписание», «Распределение», «Посещаемость», «Зачеты и экзамены», «Интерактивное взаимодействие с аудиторией», «Учеб-

ные материалы», «Успеваемость».

Приложение «Расписание» позволяет получить и изменить данные об актуальном расписании пользователя мобильного устройства. Расписание включает данные об учебных занятиях и других мероприятиях, в которых принимает участие пользователь. При изменении расписания (например, при переносе занятий) оповещаются все пользователи, участвующие в измененном мероприятии. Приложение «Расписание» предоставляет базовый набор возможностей, реализованный для всех категорий пользователей: доступ к информации о своем расписании, получение уведомлений об изменениях в расписании, получение информации о проводимых мероприятиях. Преподаватели и административный персонал также могут вносить изменения в общие расписания: изменять место или время проведения занятий, а также состав участников (например, при замене преподавателя).

Приложение «Распределение» предназначено для автоматизации распределения учебных заданий (вариантов контрольных работ, тем курсовых работ и проектов, рефератов и заданий для самостоятельной работы) и позволяет контролировать выполнение заданий. Студенты могут распределяться по подгруппам для совместного выполнения заданий. Приложение позволяет студенту самостоятельно выбрать из предлагаемого перечня интересующую его тему, а также записываться в группы для совместного выполнения лабораторных, самостоятельных и других работ. Преподавателю предоставляется возможность просмотра и редактирования сформированных списков.

Приложение «Посещаемость» позволяет проверять присутствие студентов на аудиторных занятиях (практические и лабораторные занятия, лекции, семинары), а также получать оперативную и статистическую информацию о посещаемости. При наличии в аудитории соответствующего оборудования проверка присутствия студентов на занятии может быть автоматизирована. При проведении проверки приложение контроля посещаемости учитывает получаемые из

корпоративной системы данные о расписании занятий, составе группы и техническом оснащении аудитории. В зависимости от имеющегося в аудитории оборудования приложение выбирает используемую для автоматической регистрации присутствия технологию. Поддерживаются технологии на основе QR-кодов и беспроводных каналов передачи данных Bluetooth, Wi-Fi, NFC (подходы к контролю посещаемости на основе этих технологий описаны в работах [9–12]). Результаты контроля посещаемости сохраняются в корпоративной системе.

Для студента основными функциями приложения «Посещаемость» являются регистрация на занятии и просмотр статистической информации о посещенных и пропущенных занятиях. Для преподавателя реализованы функции проведения проверки присутствия: запуск и завершение процедуры регистрации, редактирование результатов регистрации (в т. ч. ручная регистрация для тех случаев, когда автоматизированная процедура невозможна), просмотр информации о посещаемости на проведенных занятиях и мероприятиях, просмотр информации о посещаемости для учебных групп и отдельных студентов.

Приложение «Зачеты и экзамены» предоставляет информацию об итоговой аттестации: зачетах, экзаменах, курсовых работах и проектах. Основные возможности для студента: просмотр списка зачетов и экзаменов в заданном семестре и в целом в учебном плане по выбранному направлению, просмотр информации о пройденной аттестации, в т. ч. полученных оценок. В версии приложения для преподавателя добавляется возможность ввода результатов зачетов и экзаменов, а также функция просмотра статистики по студентам, группам и дисциплинам.

Приложение «Интерактивное взаимодействие с аудиторией» позволяет преподавателю автоматизировать опросы, контрольные работы или тестирование. Опросы и тестирование проводятся на основе заранее подготовленных материалов, хранящихся в корпоративной системе, в которой также сохраняются результаты опросов и тестов. Приложение предоставляет возможность

вывода оперативной и статистической информации по результатам тестирования.

Для студента основными функциями являются участие в опросе и просмотр результатов опроса. Функции для преподавателя включают выбор опроса, просмотр содержания опросов, открытие и закрытие процедуры опроса, просмотр результатов опросов, просмотр статистики по опросам.

Приложение «Учебные материалы» используется для публикации образовательных материалов. Оно предоставляет студентам возможность оперативного доступа к учебным материалам, размещенным преподавателями в корпоративной системе.

Приложение «Успеваемость» предназначено для оценки академической успеваемости студентов. Оно использует получаемые из корпоративной системы данные об учебном плане, посещаемости, результатах итоговой и промежуточной аттестации и на основе заданных преподавателями и администрацией образовательного учреждения правил формирует оценку текущей успеваемости студента и хода освоения учебного плана. Эта оценка становится доступной самому студенту, а также преподавателям и представителям администрации, участвующим в реализации образовательной программы. На основе полученных оценок успеваемости приложение также информирует студентов о возможных проблемах с выполнением ими учебного плана.

Основные функции приложения для студента: просмотр информации о собственной успеваемости, просмотр правил оценки успеваемости, получение оперативной информации о проблемах. Для преподавателей и административного персонала реализованы функции получения информации об успеваемости по предметам, группам и отдельным студентам.

Каждое из описанных приложений использует определенный набор данных, который должен быть предоставлен корпоративной информационной системой. При этом приложения не только реализуют функции просмотра данных, но и могут изменять данные в корпоративной системе. Перечень видов данных, которые используются и формируются каждым входящим

в комплекс программ приложением, приведен в таблице.

Интеграция описываемого комплекса программ с используемыми в образовательном учреждении корпоративными информационными системами производится путем реализации адаптеров, которые интерпретируют запросы мобильных приложений, извлекают данные из соответствующей информационной системы и преобразуют полученные данные в формат обмена данными с приложением. В качестве посредника используется система MDM, обеспечивающая аутентификацию каждого пользователя и предоставляющая приложениям данные о доступных сервисах. Каждый адаптер реализует только минимально необходимый набор функций доступа к данным, поскольку мобильные приложения не являются основным способом ввода данных в корпоративную информационную систему, а лишь дополняют штатные интерфейсы этой системы, упрощая взаимодействие с ней для конечных пользователей.

Описанный комплекс мобильных средств поддержки учебного процесса ориентирован на решение задач, наиболее востребованных среди преподавателей и студентов, с помощью распространенных мобильных устройств, таких как смартфоны и планшеты под управлением операционных систем Android, iOS или Windows Phone. Архитектура комплекса ориентирована на интеграцию мобильных приложений и корпоративных информационных систем образовательного учреждения.

Ключевым компонентом архитектуры является система централизованного управления мобильными устройствами. Она решает несколько принципиальных задач: осуществляет аутентификацию пользователей, обеспечивает установку и обновление программ на мобильных устройствах пользователей и реализует единый интерфейс, скрывающий от мобильных приложений детали взаимодействия с информационными системами, которые используются в качестве источников данных. Благодаря этому набор мобильных средств поддерж-

Взаимодействие приложений и корпоративных информационных систем

Приложение	Использует данные	Формирует данные
Расписание	Учебный план Преподаватели Обучающиеся Группы Аудитории Расписание	Расписание: расписание мероприятий; изменения в расписании; переносы и отмены занятий; смена преподавателя; изменение аудитории
Распределение	Учебный план Дисциплины Преподаватели Обучающиеся Группы	Обучающиеся: выданные задания; принадлежность к подгруппам
Посещаемость	Учебный план Преподаватели Обучающиеся Группы Аудитории Расписание	Обучающиеся: статистика посещаемости Расписание: списки присутствующих на мероприятии
Зачеты и экзамены	Учебный план Преподаватели Обучающиеся Группы Расписание	Обучающиеся: результаты аттестации
Интерактивное взаимодействие с аудиторией	Дисциплины Преподаватели Обучающиеся Группы	Обучающиеся: результаты опросов
Учебные материалы	Дисциплины Учебный план Преподаватели Обучающиеся	Дисциплины: опубликованные версии образовательных материалов
Успеваемость	Учебный план Преподаватели Обучающиеся Группы Расписание	Обучающиеся: оценка успеваемости; ход выполнения учебного плана

ки учебного процесса является открытым и может быть расширен новыми приложениями и сервисами.

Разработка программного обеспечения системы централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках со-

вместного проекта компании IBS (Москва) и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванченко Д.А., Попов С.О., Хмельков И.А.** Мобильные устройства и сервисы в высшем образовании: основные барьеры и направления развития // Дистанционное и виртуальное обучение. 2013. № 12(78). С. 38–48.
2. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities // *Internat. J. of Information Technology & Computer Science*. 2014. Vol. 13. No. 2. Pp. 35–41.
3. **Alzaza N. S., Yaakub A.R.** 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. Web*. 2013. Pp. 95–100.
4. **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 // *In Proc. and report of the 5th UbuntuNet Alliance Annual Conf.* 2012. Pp. 118–129.
5. **Valk J., Rashid A. T., Elder L.** Using Mobile Phones to Improve Educational Outcomes: An Analysis of Evidence from Asia // *Internat. Review of Research in Open and Distance Learning*. 2010. Vol. 11, No. 1. Pp. 13–14.
6. **Иванченко Д.А.** Управление мобильными технологиями в информационном пространстве современного вуза // *Высшее образование в России*. 2014. № 7. С. 93–100.
7. **Emery S.** Factors for consideration when developing a bring your own device (BYOD) strategy in higher education. University of Oregon, 2012. [электронный ресурс]/URL: <http://hdl.handle.net/1794/12254>
8. **Gartner IT-glossary.** [электронный ресурс]/URL: <http://www.gartner.com/it-glossary/mobile-device-management-mdm/>
9. **Bhalla V., Singla T., Gahlot A., Gupta V.** Bluetooth Based Attendance Management System // *IJIET*. 2013. Vol. 3. Iss. 1.
10. **Masalha F., Hirzallah N.** A Students Attendance System Using QR Code // *IJACSA*. 2014. Vol. 5. No. 3.
11. **More V., Nayak S.** Attendance Automation using Near Field Communication (NFC) Technology // *Internat. J. of Scientific & Engineering Research*. 2013. Vol. 4, Iss. 12. Pp. 572–575.
12. **Ayu M.A., Ahmad B.I.** TouchIn: An NFC Supported Attendance System in a University Environment // *Internat. J. of Information and Education Technology*. 2014. Vol. 4. No. 5. Pp. 448–453.

REFERENCES

1. **Ivanchenko D.A., Popov S.O., Khmelkov I.A.** Mobilnyye ustroystva i servisy v vysshem obrazovanii: osnovnyye baryery i napravleniya razvitiya, *Distsionnoye i virtualnoye obuchenie*, 2013, No. 12(78). Pp. 38–48. (rus)
2. **Samochadin A., Raychuk D., Voinov N., Ivanchenko D., Khmelkov I.** MDM based Mobile Services in Universities, *International Journal of Information Technology & Computer Science*, 2014, Vol. 13, No. 2, Pp. 35–41.
3. **Alzaza N.S., Yaakub A.R.** Students' awareness and requirements of mobile learning services in the higher education environment, *American Journal of Economics and Business Administration* 3.1 (2011): 95. *Academic OneFile. Web*, 2013, Pp. 95–100.
4. **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, *In Proceedings and Report of the 5th UbuntuNet Alliance Annual Conference*, 2012, Pp. 118–129.
5. **Valk J., Rashid A. T., Elder L.** Using Mobile Phones to Improve Educational Outcomes: An Analysis of Evidence from Asia, *International Review of Research in Open and Distance Learning*, 2010, Vol. 11, No. 1, Pp. 13–14.
6. **Ivanchenko D.A.** Upravleniye mobilnymi tekhnologiyami v informatsionnom prostranstve sovremennogo vuza, *Vyssheye obrazovaniye v Rossii*, 2014, No. 7, Pp. 93–100. (rus)
7. **Emery S.** Factors for consideration when developing a bring your own device (BYOD) strategy in higher education. University of Oregon, 2012. Available: <http://hdl.handle.net/1794/12254>
8. **Gartner IT-glossary.** Available: <http://www.gartner.com/it-glossary/mobile-device-management-mdm/>
9. **Bhalla V., Singla T., Gahlot A., Gupta V.** Bluetooth Based Attendance Management System, *IJIET*, 2013, Vol. 3, Issue 1.
10. **Masalha F., Hirzallah N.** A Students Attendance System Using QR Code. *IJACSA*, 2014, Vol. 5, No. 3.
11. **More V., Nayak S.** Attendance Automation using Near Field Communication (NFC) Technology, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2013, Vol. 4, Issue 12, Pp. 572–575.
12. **Ayu M.A., Ahmad B.I.** TouchIn: An NFC Supported Attendance System in a University Environment, *International Journal of Information and Education Technology*, 2014, Vol. 4, No. 5, Pp. 448–453.

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: Dmitry.raychuk@spbstu.ru

RAYCHUK, Dmitry Yu. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: Dmitry.raychuk@spbstu.ru

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

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

E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN, Alexander V. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: samochadin@gmail.com

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

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

E-mail: lgalod@gmail.com

NOSNITSYN, Semen M. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: lgalod@gmail.com

ХМЕЛЬКОВ Игорь Александрович – директор по консалтингу ООО «ИБС Экспертиза».

E-mail: ikhmelkov@ibs.ru

KHMELKOV, Igor A.

E-mail: ikhmelkov@ibs.ru

УДК 338.46:378

А.В. Ермаков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УНИВЕРСИТЕТА ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

A.V. Ermakov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE UNIVERSITY THROUGH THE CREATION OF AN INFORMATION-TELECOMMUNICATION SYSTEM

Рассмотрены аспекты повышения эффективности работы университета за счет использования функциональных возможностей специально создаваемой информационно-телекоммуникационной системы. Предложен методологический подход к оценке ее эффективности, учитывающий качественные изменения в триаде: учебный процесс, научные исследования и административное управление. Для каждого элемента триады эффективность определяется при помощи экспертных оценок. Результирующая оценка эффективности вычисляется как среднее арифметическое или как модуль трехмерного вектора.

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННАЯ СИСТЕМА; ЦИФРОВОЙ УНИВЕРСИТЕТ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ; УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС; НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ; АДМИНИСТРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ; ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ; СКАЛЯРНАЯ ВЕЛИЧИНА.

The article discusses the aspects of improving the efficiency of the university using the functionality of a specially designed information and telecommunication system. A methodological approach to the evaluation of its effectiveness is proposed that takes into account the qualitative changes in the triad including the learning process, research, and administration. For each element of the triad efficiency is determined with the help of expert estimations. The resulting estimation of the efficiency is calculated as the arithmetic mean or as a module of a three-dimensional vector.

INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM; DIGITAL UNIVERSITY; EFFICIENCY; LEARNING PROCESS; SCIENTIFIC RESEARCH; ADMINISTRATION; EXPERT ESTIMATIONS; SCALAR QUANTITY.

Повышение эффективности всех сфер работы университета – постоянная задача, решаемая его руководством. Существует несколько инструментов, позволяющих добиться роста эффективности и конкурентоспособности учебного заведения. Одним из таких инструментов становится современная информационно-телекоммуникационная система (ИТС). Она включает комплекс аппаратно-программных средств и линейно-кабельных сооружений, посредством которых осуществляется обмен информацией и ее обработка. Информация может быть представлена в трех основных видах: речь (звук), данные и видео.

Построение и поддержка ИТС требует существенных финансовых затрат. По этой

причине необходима оценка эффекта, порождаемого ИТС. В этой статье обсуждаются качественные аспекты эффективности ИТС. Изложенные соображения позволяют перейти к оценке эффекта с экономической точки зрения. Содержание статьи основано на исследованиях, проведенных с целью выбора перспективных принципов построения ИТС в Северо-Восточном федеральном университете (СВФУ) имени М.К. Аммосова.

Концепция цифрового университета

По своей сути ИТС неразрывно связана с концепцией «Электронный университет», которая начала формироваться в конце XX в., но до настоящего времени не имеет

четкого определения [1]. В последние годы стал популярен новый термин – «Цифровой университет», что объясняется широким использованием одноименных технологий во многих сферах жизни общества, включая и систему образования [2]. По сути оба термина можно считать синонимами.

Исторически идея «Цифрового университета» сначала рассматривалась как элемент системы дистанционного образования, история которого, по мнению авторов монографии [3], насчитывает более ста лет. Содержание термина «Цифровой университет» постоянно дополнялось за счет появления новых парадигм высшего образования и использования различных технических средств – от простейших устройств до самых сложных систем. В этом разделе кратко сформулировано семь тезисов, которые существенно влияют как на принципы построения ИТС, так и на ее дальнейшее развитие.

1. Раньше студент шел в университет, а в будущем университет пойдет к студенту. Этот тезис не следует воспринимать буквально. Он был предложен и для школы, и для университета. Причем в последнем случае подразумевается возможность постоянного обучения и повышения своей квалификации. Кроме того, данный тезис подчеркивает возможность проведения процесса обучения и в том случае, если студент находится вне территории университета.

2. Университет работает по принципу «365 – 7 – 24». Данный принцип широко применяется для характеристики доступности технических систем. Применительно к концепции «Цифровой университет» числа в кавычках означают, что ресурсы обучения доступны весь год, семь дней в неделю и двадцать четыре часа в сутки. Случаи кратковременных отказов в доступе, обусловленные конечной надежностью технических средств, не учитываются.

3. Обучение может проводиться по индивидуальным программам. Такая возможность эффективна с учетом удобства разных форм восприятия информации студентом. Например, можно:

прослушать полный курс лекций, а потом выполнить лабораторные работы;

прослушать часть лекций, после которых сразу выполнить те лабораторные работы, которым посвящен теоретический курс;

прослушать краткий курс лекций, выполнить все лабораторные работы, а потом подробно ознакомиться с теоретической частью дисциплины.

Подобные возможности требуют введения гибкой системы работы кафедр и лабораторий. Это, в свою очередь, требует применения специального программного обеспечения для составления расписаний.

4. Возможность выбора преподавателя (для ряда дисциплин). Некоторые предметы (в частности, математика, физика, ряд гуманитарных дисциплин) состоят из курса лекций, суть которых меняется медленно. Для получения знаний могут использоваться записанные заранее лекции выдающихся ученых, отличающихся хорошей методологией преподавания. Следует отметить, что чтение таких лекций осуществляется без обратной связи от студента к преподавателю, что, несомненно, снижает эффективность восприятия информации. По всей видимости, *возможность выбора преподавателя* лучше рассматривать как дополнение к общению с лектором, который выбран кафедрой.

5. От конкурирующих парадигм обучения – к взаимодополняющим решениям. В концепции «Цифровой университет» ранее выделялось несколько парадигм обучения. Часто эти парадигмы были несовместимы, т. е. конкурировали между собой. Современный этап развития технических средств, применяемых в обучении, обеспечивает выбор лучшего из каждой парадигмы. Такой подход позволяет рассматривать их как взаимодополняющие.

6. Качественное улучшение «обратной связи». Построение ИТС в составе «Цифрового университета» позволяет качественно улучшить «обратную связь» между студентом и преподавателем. Для этого могут использоваться разные информационные технологии. Кроме того, организация «обратной связи» поддерживается большинством видов терминального оборудования, которое применяется участниками процесса обучения.

7. Анализ и прогнозирование требований к выпускникам. Конкурентоспособность выпускников на рынке труда – один из важнейших показателей уровня работы университета. Для повышения конкурентоспособности выпускников необходимо анализировать требования рынка труда, а также прогнозировать их на пять-десять лет. Решение такой задачи требует разработки специальной системы, функционирование которой будет поддерживаться при помощи ИТС.

Важной особенностью ИТС следует считать возможность моделирования (в широком смысле этого слова) тех процессов и объектов, которые сложно или невозможно изучать непосредственно. С этой точки зрения ИТС можно рассматривать как инструмент, который позволяет реализовать обучение, отвечающее принципам, сформулированным в древней китайской притче: «Скажи мне – и я забуду; покажи мне – и я запомню; дай сделать – и я пойму».

Цели и задачи построения ИТС

Для определения назначения ИТС, поставленных перед ней целей и основных задач, необходимо провести анализ тех аспектов развития СВФУ, которые прямо или косвенно определяют основные информационные процессы, характерные для перспективных систем образования и научных исследований. С точки зрения учебного процесса для СВФУ как университета федерального уровня актуальны следующие цели:

- предоставление образовательных услуг на уровне мировых стандартов;
- поддержание актуальности учебных программ за счет их постоянного обновления;
- обеспечение удаленного доступа пользователей к образовательным услугам.

Эти цели выделены с точки зрения ИТС. Они позволяют сформулировать основные цели собственно ИТС, актуальные в настоящее время и на длительную перспективу. Данные цели можно представить в виде трех положений:

- создание и периодическое обновление распределенной базы знаний (БЗ), в кото-

рой хранится информация для поддержки учебного процесса и научных исследований;

- построение и постоянное развитие мультисервисной сети, позволяющей осуществлять обмен информацией разного рода, необходимой для поддержки учебного процесса и научных исследований;

- организация системы управления (СУ) для поддержки всех ключевых параметров ИТС в заранее установленных границах.

БЗ (knowledge base) – это особого рода база данных, предназначенная для оперирования метаданными. База знаний содержит структурированную информацию, покрывающую некоторую область знаний, для использования с конкретной целью. Современные базы знаний работают совместно с системами поиска информации, имеют четкую систему классификации и специфицированный формат представления данных.

Перечисленные цели построения ИТС позволяют перейти к задачам, которые следует решить для ее построения и последующей эволюции. Эти задачи целесообразно сформулировать в виде семи основных направлений:

1) разработка архитектуры ИТС, способной адаптироваться к меняющимся требованиям и эволюционировать в соответствии с новыми достижениями научно-технического прогресса;

2) определение потребности в ресурсах ИТС в настоящее время и разработка прогнозов на перспективу;

3) составление перечня услуг, поддерживаемых ИТС на основных этапах ее развития;

4) разработка принципов построения информационного компонента ИТС;

5) разработка принципов построения телекоммуникационного компонента ИТС;

6) формирование предложений по выбору комплекса технических средств, предназначенных для практической реализации ИТС;

7) оценка стоимостных показателей ИТС, ее эффективности, сроков окупаемости и рисков развития.

Каждая из перечисленных задач вклю-

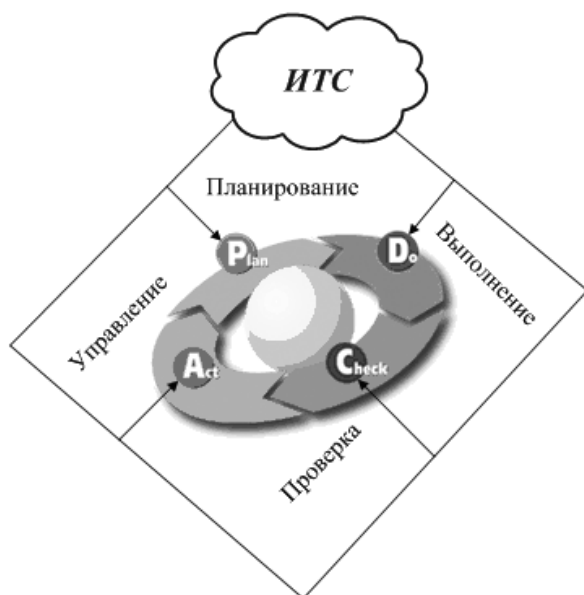


Рис. 1. Роль ИТС в цикле Деминга–Шухарта

чает в себя совокупность подзадач, требующих детальной постановки и корректного решения. Постановка подобных подзадач – предмет отдельной статьи.

Назначение ИТС можно рассматривать с разных точек зрения. Для формализован-

ного анализа основных процессов уместно использовать модель управления, известную как цикл Деминга–Шухарта [4]. Она известна по аббревиатуре PDCA (Plan – Do – Check – Act). Заметим, что Деминг предпочитал использовать сокращение PDSA (Plan – Do – Study – Act). На русский язык последовательность упомянутых операций переводится так: Планирование – Выполнение – Проверка – Управление. Роль ИТС с точки зрения модели PDCA показана на рис. 1. Он подчеркивает тот факт, что ресурсы ИТС будут задействованы во всем цикле PDCA.

Цикл Деминга–Шухарта начинается с элемента «Планирование» Этот термин подразумевает тщательную разработку всех основных процессов, необходимых для достижения поставленных целей, составление перечня необходимых работ, а также выделение и распределение необходимых ресурсов.

Элемент «Выполнение» связан с реализацией всех мероприятий, которые были запланированы. Обычно при реализации большой и сложной системы вводятся некоторые изменения. Для того чтобы оце-



Рис. 2. Роль ИТС в пирамидальной модели

нить эти изменения в модель введен элемент «Проверка». Ее задачи заключаются в сборе доступной информации на основе *ключевых показателей эффективности*. Они известны по аббревиатуре КРІ (key performance indicators). В результате выявляются отклонения, анализируются причины их возникновения и возможные последствия (потенциальные угрозы).

Далее в рассматриваемом цикле размещен элемент «Управление». В ряде публикаций он называется *воздействием* или *корректировкой*. Суть этой части цикла Деминга–Шухарта заключается в принятии мер по устранению причин нежелательных отклонений от запланированного результата, что связано с возвращением к элементу «Планирование». Операция возврата и формирует цикл PDCA.

Цикл Деминга–Шухарта удобен для анализа динамики исследуемых процессов. С этой точки зрения он весьма эффективен для анализа тех причин модернизации ИТС, которые обусловлены эволюцией СВФУ. Пирамидальная модель, приведенная на рис. 2, позволяет детально рассмотреть статику исследуемого объекта. Эта модель удачно иллюстрирует те сферы, для которых необходимы услуги ИТС (со-

кращение ППС расшифровывается как профессорско-преподавательский состав).

При необходимости каждый фрагмент предложенной модели может быть детализирован. Такая возможность полезна с учетом различия требований, предъявляемых к ИТС типичными группами пользователей.

Принципы декомпозиции ИТС

Комплекс технических средств ИТС, включая используемое ею программное обеспечение, представляет собой т. н. сложную систему [5]. Для анализа сложных систем часто используется прием, называемый *декомпозицией*. Суть декомпозиции заключается в выделении небольшого набора базовых элементов. Эти элементы должны отражать основные процессы, протекающие в ИТС. Каждый выделенный элемент может рассматриваться как «черный ящик» [6]. Его модель показана на рис. 3. Она включает два элемента: управляющую и управляемую системы, которые обмениваются между собой командами и отчетами.

Процесс $A(t)$ на входе модели в общем случае рассматривается как случайный [7]. Процесс функционирования модели может описываться суперпозицией двух процессов: $B(t)$ и $C(t)$. В штатных условиях функциони-

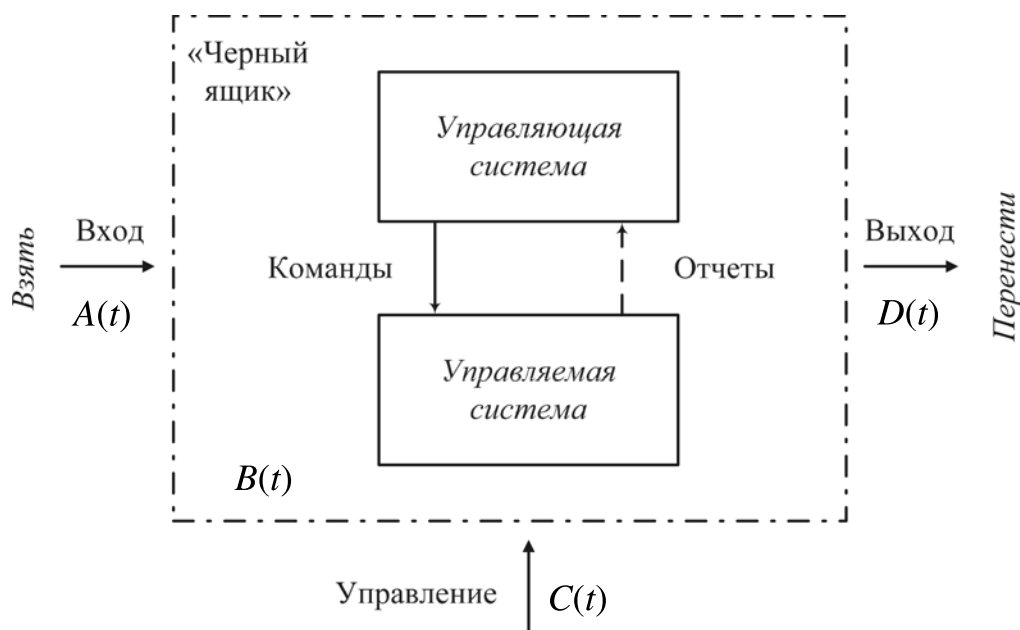


Рис. 3. Модель основного элемента ИТС в виде «черного ящика»

рования основная роль отводится процессу $B(t)$. Процесс $C(t)$ представляет собой формализованное воздействие на модель функций управления, которые определяются на основе информации о работе исследуемого объекта. Процесс $D(t)$ описывает результат функционирования модели.

Процессы $A(t)$ и $D(t)$ удобно рассматривать как формализованное описание связки операций «взять и перенести». Применительно к ИТС эти глаголы означают следующее: надо «взять» информацию в точке x и «перенести» ее в точку y . В ряде случаев вместо точек x и y удобнее оперировать множествами $\{X\}$ и $\{Y\}$ соответственно. При этом (с точки зрения ИТС) можно выделить три важных требования:

- информацию необходимо доставить с учетом ограничений по времени;
- потери в составе передаваемой информации не должны превышать заранее заданный уровень;
- искажения в принятых сообщениях не могут быть большими, чем заданные пороговые значения.

Можно предложить несколько методологических подходов к формированию принципов декомпозиции ИТС. Эти подходы определяются теми задачами, которые предстоит решать применительно к ИТС, играющей роль объекта исследования. Для задач, сформулированных в техническом задании в СВФУ, представляется логичным выделить *три основных элемента* в составе ИТС:

телекоммуникационный компонент;
информационный компонент;
управляющий компонент, поддерживающий также функции технической эксплуатации.

Каждый из трех элементов, в свою очередь, представляет сложную систему. К любому из перечисленных компонентов применима операция декомпозиции, если эта процедура необходима для анализа каких-либо объектов и/или процессов.

Методологический подход к оценке эффективности ИТС

Сложность выбора методики для оценки эффективности ИТС заключается в том,

что она выполняет множество функций, востребованных в разных аспектах. В частности, применение ИТС для оптимизации работы аппарата управления университетом улучшает качество ряда бизнес-процессов, что позволяет использовать известные методы оценки экономической эффективности. Использование функциональных возможностей ИТС для проведения научных исследований стимулирует применение иных методов оценки эффективности. Наконец, реализация функций ИТС для совершенствования учебного процесса связана с выбором собственного подхода к оценке эффективности. Иными словами, показатель, который в экономической теории называется «полезным эффектом», будет различным с точки зрения отдельных групп пользователей ИТС.

Очевидно, что должны учитываться подходы к оценке эффективности университета в целом [8], но их следует доработать для возможности вычленения ИТС как самостоятельного объекта. Основные сферы применения ИТС, как следует из рассмотренной выше пирамидальной модели, заключаются в поддержке следующей триады:

- учебный процесс (learning process – l);
- научные исследования (research – r);
- административное управление (management – m).

После введения ИТС в эксплуатацию можно опросить представительную группу специалистов из триады об их субъективной оценке, определяющей значение ИТС. Предположим, что в момент времени t_1 по пятибалльной шкале респонденты дали по две оценки, определяющие достижение цели до и после появления ИТС. Эти оценки можно записать в виде следующего кортежа:

$$\{E_l(t_1), E_l^{\text{ИТС}}(t_1), E_r(t_1), E_r^{\text{ИТС}}(t_1), E_m(t_1), E_m^{\text{ИТС}}(t_1)\}. \quad (1)$$

Нижние индексы соответствуют введенным выше обозначениям компонентов триады. Наличие верхнего индекса указывает на тот факт, что данная оценка выставлена для случая, когда ИТС введена в эксплуатацию и востребована в работе.

Значения эффективности ИТС в момент времени t_1 для каждой сферы ее применения — $P_l(t_1)$, $P_r(t_1)$, $P_m(t_1)$ — определяются очевидным образом:

$$\begin{aligned} P_l(t_1) &= \frac{E_l^{\text{ИТС}}(t_1) - E_l(t_1)}{E_l^{\text{ИТС}}(t_1)}, \\ P_r(t_1) &= \frac{E_r^{\text{ИТС}}(t_1) - E_r(t_1)}{E_r^{\text{ИТС}}(t_1)}, \\ P_m(t_1) &= \frac{E_m^{\text{ИТС}}(t_1) - E_m(t_1)}{E_m^{\text{ИТС}}(t_1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результирующее значение эффективности $P(t_1)$ логичнее выразить одним из двух способов: как среднее арифметическое или как модуль трехмерного вектора [9]

$$\begin{aligned} P(t_1) &= \frac{P_l(t_1) + P_r(t_1) + P_m(t_1)}{3}, \\ P(t_1) &= \sqrt{P_l^2(t_1) + P_r^2(t_1) + P_m^2(t_1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выбор лучшего способа целесообразно отложить до проведения аналогичных опросов в моменты времени t_2, t_3, \dots, t_n . В результате получатся две функции вида $P(t)$. Из них следует выбрать одну, наиболее адекватно, по мнению специально созданной экспертной группы, отражающую изменение эффективности ИТС во времени. При удачном развитии функциональных возможностей ИТС функция $P(t_1)$ должна быть монотонной. Если это условие не соблюдается, то необходимо проанализировать причины изменения реакции пользователей на работу ИТС.

Предлагаемый методологический подход отличается простотой и наглядностью, но он не должен рассматриваться как единственно возможное решение. По мере накопления опыта эксплуатации ИТС следует рассмотреть и другие варианты оценки ее

эффективности. Например, в формулы (3) могут быть введены весовые коэффициенты, учитывающие важность каждого компонента триады.

Использование современных информационно-телекоммуникационных технологий становится важным фактором улучшения работы современных учебных заведений. Информационно-телекоммуникационные технологии особо важны для университетов. Для реализации подобных технологий создается ИТС — информационно-телекоммуникационная система. Она позволяет решать комплекс задач для обучения, научных исследований и управления университетом.

Создание и поддержка ИТС — сложный процесс, требующий значительных инвестиций. По этой причине актуализируются задачи оценки эффективности ИТС и ее влияния на основные направления деятельности университета в целом. В настоящее время научное сообщество еще не пришло к единому мнению по выбору методологии таких оценок.

В данной статье предложен методологический подход к оценке эффективности университета, в котором создана ИТС. Этот подход основан на балльной оценке эффектов, возникающих в учебном процессе, научных исследованиях и системе административного управления. Далее полученные оценки обрабатываются так, чтобы результат был представлен скалярной величиной. Эта скалярная величина оценивается в разные моменты времени, что позволяет проанализировать динамику изменения эффективности ИТС и, при необходимости, принять меры к исправлению выявленных ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yenbamrung P.** The Emerging Electronic University: Distance Education for the Twenty-first Century // 16th World Conf. of the International Council for Distance Education. Bangkok: ICDE, 1992.
2. **McCluskey F., Winter M.** The Idea of the Digital University: Ancient Traditions, Disruptive Technologies and the Battle for the Soul of Higher Education. Westphalia Press, 2013.
3. **Verduin J.R., Clark T.A.** Distance education: the foundations of effective practice. San Francisco. Jossey-Bass, 1991.
4. **Репин В.В., Елиферов В.Г.** Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: РИА «Стандарты и качество», 2008. 408 с.
5. **Новосельцев В.И., Тарасов Б.В.** Теоретические основы системного анализа. М.:

Майор, 2013.

6. **Бейзер Б.** Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем. СПб.: Питер, 2004.

7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Издат. центр «Академия», 2005.

8. **Гафорова Е.Б., Карловский А.В.** О подходах к оценке эффективности деятельности вузов // Вестник НГУ. Социально-экономические науки. 2009. Т. 9. Вып. 3. С. 81–87.

9. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986.

REFERENCES

1. **Yenbamrung P.** The Emerging Electronic University: Distance Education for the Twenty-first Century, *16th World Conference of the International Council for Distance Education*. Bangkok: ICDE, 1992.

2. **McCluskey F., Winter M.** *The Idea of the Digital University: Ancient Traditions, Disruptive Technologies and the Battle for the Soul of Higher Education*. Westphalia Press, 2013.

3. **Verduin J.R., Clark T.A.** *Distance education: the foundations of effective practice*. San Francisco, Jossey-Bass, 1991.

4. **Repin V.V., Yeliforov V.G.** *Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovaniye biznes-protsessov*. Moscow: Standarty i kachestvo Publ., 2008, 408 p. (rus)

5. **Novoseltsev V.I., Tarasov B.V.** *Teoreticheskiye*

osnovy sistemnogo analiza. Moscow: Mayor Publ., 2013. (rus)

6. **Beyzer B.** *Testirovaniye chernogo yashchika. Tekhnologii funktsionalnogo testirovaniya programmnogo obespecheniya i sistem*. St. Petersburg: Piter Publ., 2004. (rus)

7. **Venttsel Ye.S.** *Teoriya veroyatnostey*. Moscow: Izdatelskiy tsentr "Akademiya" Publ., 2005. (rus)

8. **Gafforova Ye.B., Karlovskiy A.V.** О подходах к оценке эффективности деятельности вузов, *Vestnik NGU. Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*, 2009. Vol. 9, No. 3, Pp. 81–87. (rus)

9. **Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A.** *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov*. Moscow: Nauka Publ., 1986. (rus)

ЕРМАКОВ Алексей Валентович – проректор по техническому направлению Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, кандидат экономических наук.

677000, Респ. Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, д. 58.

E-mail: Ermakov-it@yandex.ru

ERMAKOV, Aleksey V. *North-Eastern Federal University in Yakutsk*.

677980, Belinskiy Str. 58, suite 312, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

E-mail: Ermakov-it@yandex.ru

УДК 004.7

Д.Ю. Райчук, А.В. Самочадин, Д.А. Тимофеев, А.А. Лукин, И.А. Хмельков

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РЕГИСТРАЦИИ УЧАСТНИКОВ МЕРОПРИЯТИЙ

D.Yu. Raychuk, A.V. Samochadin, D.A. Timofeev, A.A. Lukin, I.A. Khmelkov

AN APPROACH TO AUTOMATED ATTENDANCE CHECKING OF EVENTS PARTICIPANTS

Рассмотрены методы автоматизированной идентификации и учета присутствия участников мероприятий. Для регистрации участников предлагается использовать мобильные устройства. Система регистрации реализована на базе централизованной системы управления мобильными устройствами, что обеспечивает прозрачную идентификацию пользователей и возможность интеграции с другими сервисами.

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ; МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА; МЕНЕДЖЕР МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.

Attendance checking is a time-consuming, yet important activity in many kinds of events. Most approaches to attendance checking automation require specialized equipment to be installed. A more appealing approach is to use mobile devices such as smartphones that are ubiquitous nowadays. We propose a context-aware attendance checking service based on a mobile device management (MDM) system. This approach may be used during a wide spectrum of events, and requires a limited set of equipment that is commonly available when a conference or a lecture takes place. The service can identify an attendee's mobile device using QR-codes, Bluetooth, or Wi-Fi. User authentication is provided by the underlying MDM system.

ATTENDANCE CHECKING; MOBILE DEVICES; MOBILE DEVICES MANAGEMENT.

Деятельность образовательных учреждений связана с организацией мероприятий учебного, научного или организационного характера, таких как лекции, семинары или конференции. При проведении подобных мероприятий обычно необходимо учитывать присутствие на них участников.

Для учебных занятий контроль посещаемости является важной составляющей образовательного процесса. Учет результатов контроля посещаемости при итоговой или промежуточной аттестации стимулирует студентов не пропускать занятия, а для преподавателя анализ посещаемости дает информацию о потенциальных проблемах с освоением материала курса у каждого из студентов. В частности, исследования [1, 2] свидетельствуют о наличии статистически значимой взаимосвязи между посещаемостью занятий и академической успеваемостью. При проведении открытых докладов, рассчитанных на широкую аудиторию,

идентификация присутствующих не является обязательной, но может дать докладчику представление об аудитории, позволяя установить более тесную связь со слушателями.

Традиционным методом контроля посещаемости в учебных заведениях является переключка. В малых группах, которые преподаватель хорошо знает, он может достаточно быстро отметить присутствующих на занятии студентов самостоятельно, но при проведении поточных занятий для нескольких групп проверка присутствия студентов требует значительного времени, которое отнимается от времени занятия. В условиях открытых мероприятий, когда точный состав аудитории заранее неизвестен, участники могут предоставить сведения о себе самостоятельно — для этого нередко используется лист регистрации.

Поскольку традиционная регистрация участников часто оказывается трудоемкой,

целесообразно автоматизировать этот процесс. Для этого используются устройства на базе RFID [3, 4], идентификация на основе биометрических показателей [5–8], распознавание лиц [9, 10], мобильные телефоны [5, 11, 12].

Благодаря повсеместному распространению, мобильные устройства (в частности, смартфоны) представляются наилучшим выбором в качестве инструмента автоматизированной регистрации участников лекций, семинаров и других подобных мероприятий. По данным [13], практически все студенты ведущих университетов России пользуются мобильными устройствами, способными выполнять установленные пользователем приложения. Если использовать такие устройства при регистрации участников мероприятий, которые проводит учебное заведение, в т. ч. при проверке присутствия студентов на занятиях, процесс регистрации можно автоматизировать без установки специализированного дополнительного оборудования в аудиториях.

Мы предлагаем строить систему автоматизированной регистрации участников мероприятий с использованием возможностей современных систем централизованного управления мобильными устройствами (менеджеров мобильных устройств – ММУ). Регистрация участников в таком случае становится контекстно-зависимым сервисом, который реализуется в качестве приложения ММУ. При этом обеспечивается интеграция сервиса регистрации участников с другими сервисами ММУ, что открывает ряд новых возможностей, например, получение расширенной информации об участниках мероприятия или рассылка участникам дополнительных материалов.

Мы делаем следующие предположения относительно функционирования ММУ в организации.

1. Сотрудники организации (в случае образовательного учреждения также и студенты) используют мобильные устройства, способные выполнять установленные пользователем программы и зарегистрированные в базе данных ММУ.

2. ММУ имеет возможность однозначно

идентифицировать пользователя на основе информации, получаемой при взаимодействии ММУ и мобильного устройства.

3. Мобильные сервисы, выполняемые под управлением ММУ, могут взаимодействовать с другими ресурсами организации, такими как базы данных сотрудников (студентов), аудиторий, календари, средства управления мероприятиями. Это предположение не является обязательным условием, но интеграция сервисов открывает более широкие возможности при использовании мобильных устройств в бизнес-процессах организации, в т. ч. при регистрации участников и проведении мероприятий.

Описываемый сервис регистрации реализуется в системе ММУ, совместно разрабатываемой корпорацией IBS и Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом.

Функции сервиса регистрации

Под мероприятием мы будем понимать событие, зарегистрированное в программном обеспечении ММУ и характеризующееся наименованием, временем и местом проведения. Ведущий мероприятия отвечает за проведение мероприятия, управление списком участников и регистрацию участников, присутствующих на мероприятии, и имеет соответствующие права при взаимодействии с сервисом регистрации.

Основные функции сервиса регистрации участников мероприятий для ведущего представлены на рис. 1.

Функция авторизации пользователя предназначена для разграничения доступа пользователей к средствам управления регистрацией на основе их роли на каждом мероприятии. Авторизация производится при обращении ко всем остальным функциям сервиса регистрации.

Функции поиска и просмотра информации о мероприятиях позволяют получить информацию о прошедших, текущих и планируемых мероприятиях, включая сведения о дате и месте проведения мероприятия, времени начала и завершения. Функции поиска и просмотра информации об участниках позволяют получать списки фактических участников прошедших или



Рис. 1. Основные функции сервиса регистрации для ведущего

текущих мероприятий и сведения о каждом участнике. Также для каждого мероприятия ведущий может получить списки лиц, предварительно зарегистрировавшихся для участия в мероприятии.

Регистрация присутствующих производится во время проведения мероприятия. Решение о начале и завершении процедуры регистрации принимает ведущий. Регистрация производится в автоматизированном режиме с использованием мобильных устройств участников, но ведущий имеет возможность вручную отметить присутствие участника на мероприятии.

Участие в мероприятии предполагает изменение статуса участника на время мероприятия. По завершении процедуры регистрации участники считаются присутствующими на мероприятии, что может, при наличии соответствующей политики, привести к применению специальных настроек мобильных устройств (например,

на мобильных устройствах может быть автоматически выключен звуковой сигнал) или отразиться на профиле пользователя в других сервисах ММУ (например, установке статуса «занят» в календаре пользователя). После завершения мероприятия необходимо применить прежние настройки к устройствам и профилям. Эта операция, названная на рис. 1 «отменой регистрации», может быть выполнена автоматически, когда текущее время перейдет заданную для мероприятия отметку, либо вручную ведущим мероприятия.

Кроме основных функций, сервис регистрации может предоставлять пользователям доступ к опубликованным в рамках мероприятия документам, давать ведущему возможность автоматизированного опроса участников, а каждому из участников – возможность передавать ведущему или докладчику вопросы и пожелания с помощью своих мобильных устройств.

Процедура регистрации

Для автоматической регистрации участников с помощью мобильных устройств необходимо установить факт присутствия обладателя конкретного мобильного устройства в заданном месте во время проведения мероприятия. Таким образом, входными данными для сервиса регистрации являются два элемента данных: данные о текущем времени, получение которых не представляет сложности, и данные о местонахождении устройства.

Этот набор данных составляет контекст, в котором выполняется каждый запрос к сервису регистрации. Например, текущее время и местоположение мобильного устройства ведущего мероприятия может быть учтено при его обращении к интерфейсу системы регистрации, что позволит сразу же предоставить ведущему сведения о текущем мероприятии, сократив время, необходимое на поиск. Для участника мероприятия знание того, что в заданное время он находится в месте проведения этого мероприятия, теоретически позволяет зарегистрироваться автоматически, не требуя от него никаких действий. Тем не менее на практике такая автоматическая регистрация редко оказывается возможной.

Основные проблемы при автоматической регистрации участников связаны с низкой точностью определения местоположения мобильных устройств в помещениях [14]. ММУ трудно отделить устройства участников мероприятия от устройств, расположенных в соседней комнате. Кроме того, в многоэтажных зданиях необходимо определять не только координаты устройства, но и высоту, на которой оно находится, что дополнительно снижает точность локализации.

Таким образом, для точного учета присутствия участников на мероприятии необходима дополнительная информация, позволяющая снять возникающую из-за неточного определения местоположения мобильного устройства неопределенность. Мы реализуем три метода получения этой информации.

1. Локализация на основе уникальных данных, доступных только в процессе регистрации в помещении, в котором проводится мероприятие: автоматическое формирование QR-кода, который должен быть распознан мобильным устройством участника.

2. Локализация на основе физической близости устройств: автоматическое формирование мобильным устройством участника

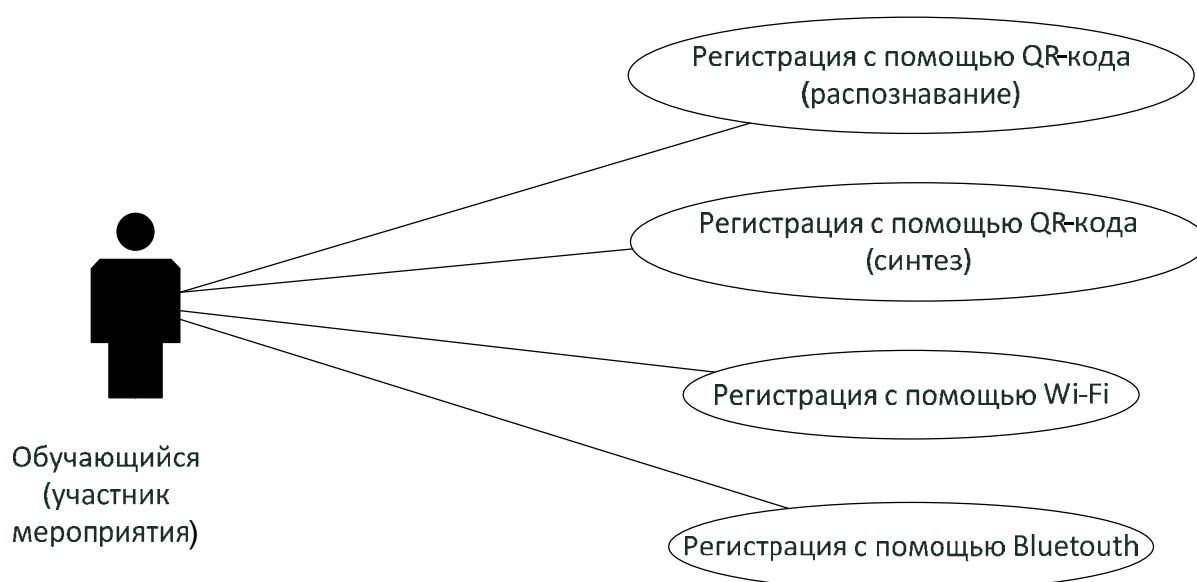


Рис. 2. Поддерживаемые методы регистрации участников

уникального QR-кода, который распознается устройством ведущего мероприятия, или регистрация с помощью соединения Bluetooth.

3. Локализация на основе общего канала передачи данных: регистрация при помощи беспроводной сети Wi-Fi.

В описываемой системе каждому из этих методов соответствует процедура регистрации участника (рис. 2).

Регистрация путем распознавания QR-кода в целом соответствует ранее описанному подходу [12]. В начале процедуры регистрации на демонстрационный экран выводится QR-код, содержащий случайный временный ключ. Каждый участник мероприятия с помощью своего мобильного устройства распознает QR-код и передает сервису регистрации полученный ключ. Участник регистрируется, если переданный им ключ совпал с ожидаемым ключом. При необходимости в течение процедуры регистрации ключ и отображаемый QR-код могут меняться.

Для использования QR-кодов, синтезируемых устройствами участников мероприятия, необходимо снабдить устройство ведущего камерой. Для регистрации каждый участник получает от сервиса регистрации персональный случайный ключ и отображает соответствующий ключу QR-код на экране устройства. После этого участник подносит мобильное устройство к камере устройства ведущего, которое распознает код и передает полученный ключ сервису регистрации. Участник регистрируется на мероприятии, если устройство ведущего этого мероприятия передало ключ участника сервису регистрации.

Этот же метод регистрации может быть реализован без использования камеры, если персональный ключ передается устройству ведущего с использованием канала Bluetooth. Локализация при этом обеспечивается за счет ограниченного радиуса действия передатчиков Bluetooth. Кроме Bluetooth могут использоваться и другие технологии передачи данных малого радиуса действия, однако устройства Bluetooth в настоящее время наиболее распространены.

При регистрации с помощью сети Wi-Fi участники мероприятия подключаются к определенной точке доступа. Сервис регистрации обращается к точке доступа и проверяет факт подключения к ней устройства, с которого поступил запрос на регистрацию. Этот метод наиболее удобен, т. к. не требует от участника никаких дополнительных действий. Тем не менее этот метод имеет ряд ограничений, связанных с особенностями взаимодействия с сетевым оборудованием различных производителей.

Предлагаемый подход к регистрации участников опирается на известные и описанные в литературе методы, но его отличительной чертой является интеграция различных методов регистрации и данных о контексте, в котором применяются эти методы. Как следствие, организаторы мероприятий не ограничены единственным методом регистрации: несколько методов могут использоваться одновременно. Например, если возможности аудитории позволяют получить достаточно точную информацию о присутствии пользователя с помощью анализа данных о местоположении его мобильного устройства и факта подключения к беспроводной сети аудитории, организаторы мероприятия автоматически получают информацию о присутствующих участниках. В то же время, при необходимости, они могут использовать другие автоматизированные методы для того, чтобы зарегистрировать участников, чье присутствие не было зарегистрировано автоматически, или отметить их присутствие вручную.

Важным критерием качества метода регистрации участников мероприятий является точность учета участников. В образовательных учреждениях многие мероприятия (в первую очередь, учебные занятия) носят обязательный характер. Как следствие, одним из требований к процедуре регистрации становится защита от регистрации отсутствующих студентов. Эта проблема особенно заметна на поточных занятиях, когда количество студентов велико, и преподаватель может не иметь возможности запомнить каждого из студентов. Часто

применяемый на практике неавтоматизированный метод, когда студенты записывают или отмечают свои имена в листе регистрации, позволяет отметить и отсутствующих студентов. Использование принадлежащих студентам мобильных устройств, которые однозначно идентифицируются системой MDM, затрудняет регистрацию студентов, чьи мобильные устройства отсутствуют в аудитории, но ложная регистрация остается, тем не менее, возможной.

Для регистрации с помощью мобильного устройства необходимо передать на сервер регистрации запрос с корректными данными. Для предотвращения удаленной регистрации отсутствующих студентов используются два фактора: серверу регистрации разрешается принимать запросы только с адресов локальной сети организации, а при регистрации учитываются данные о местоположении пользователя. Данные о местоположении предоставляются сервером MDM и уточняются с помощью описанных выше методов локализации, которые позволяют убедиться, что мобильное устройство физически находится в аудитории.

Проанализируем способы локализации с точки зрения возможности регистрации отсутствующего студента. При локализации устройства на основе факта его регистрации в определенной точке доступа Wi-Fi студент имеет возможность подключиться к этой точке доступа, находясь за пределами аудитории. При использовании QR-кодов, распознаваемых устройством студента, для регистрации необходимо получить демонстрируемое изображение. Не находясь в аудитории, это можно сделать с помощью присутствующих на занятии студентов, которые передадут изображение на устройства по электронной почте или по другим каналам связи. Присутствие мобильного устройства студента в аудитории необходимо, если используется способ локализации на основе близости устройств (путем синтеза QR-кода на устройстве студента или связи устройств по каналу Bluetooth). Таким образом, если необходимо максимально усложнить возможность регистрации отсутствующих студентов, предпочтитель-

ным способом получения дополнительной информации о местоположении мобильного устройства студента является метод на основе физической близости устройств.

Принципиальным ограничением описываемого подхода является то, что при регистрации участника мероприятия идентифицируется не сам участник, а его мобильное устройство. Чтобы быть отмеченным в качестве присутствующего, студенту достаточно передать свой телефон товарищу, который с помощью этого телефона выполнит необходимые для регистрации шаги. Та же проблема возникает при использовании других идентифицируемых объектов (например, датчиков RFID). Для ее решения можно включить в процесс идентификации сбор биометрических данных. В частности, некоторые новые модели смартфонов содержат датчики, позволяющие считывать отпечатки пальцев пользователя. Тем не менее учет посещаемости, при всей важности, не является единственным критерием оценки академической успеваемости студента и приобретаемых им знаний, поэтому чрезмерное усложнение процедуры регистрации студентов представляется неоправданным.

В статье предложен новый подход к автоматизации процесса регистрации участников мероприятий. Его отличительной чертой является интеграция сервиса регистрации и системы централизованного управления мобильными устройствами организации.

Описанные технологии автоматизированной регистрации позволяют сократить время, необходимое для идентификации участников мероприятия. При этом предлагаемый сервис может использоваться в аудиториях с различным оборудованием и применяться для многих видов проводимых мероприятий. Используемые подходы к локализации мобильных устройств позволяют компенсировать невысокую точность определения местоположения в помещениях, а применение системы централизованного управления мобильными устройствами обеспечивает прозрачную

идентификацию пользователей и взаимодействие с другими информационными системами организации.

На данный момент реализованы три метода, позволяющие установить присутствие регистрируемого участника в аудитории: методы на основе распознавания и синтеза QR-кодов и метод, использующий факт подключения устройства к заданной сети Wi-Fi. Конкретный метод регистрации может быть выбран с учетом особенностей проводимого мероприятия и доступной ап-

паратуры. Возможно также одновременное использование нескольких методов для повышения точности и повышения удобства процесса регистрации для пользователей.

Разработка программного обеспечения для систем централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках совместного проекта компании IBS (Москва) и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Newman-Ford L., Fitzgibbon K., Lloyd S., Thomas S. A large-scale investigation into the relationship between attendance and attainment: a study using an innovative, electronic attendance monitoring system // *Studies in Higher Education*. 2008. No. 33(6). Pp. 699–717.

2. Cred  M., Roch S.G., Kieszczyńska U.M. Class Attendance in college. A Meta-Analytic Review of the Relationship of Class Attendance With Grades and Student Characteristics // *Review of Educational Research*. 2010. No. 80(2). Pp. 272–295.

3. Silva F., Filipe V., Pereira A. Automatic Control of Students' Attendance in Classrooms Using RFID // *ICSNC'*. 2008. Pp. 384–389.

4. Arulogun O.T., Olatunbosun A., Fakolujo O.A., Olaniyi O.M. RFID-Based Students Attendance Management System // *IJSER*. 2013. Vol. 4. Iss. 2.

5. Bhalla V., Singla T., Gahlot A., Gupta V. Bluetooth Based Attendance Management System // *IJIET*. 2013. Vol. 3. Iss. 1.

6. Verma P., Gupta N. Fingerprint Based Student Attendance System Using GSM // *IJSR*. 2013. Vol. 2. Iss. 10.

7. Rao S., Satoa K.J. An Attendance Monitoring System Using Biometrics Authentication // *IJAR CASSE*. 2013. Vol. 3. Iss. 4.

8. Kadry S., Smaili K. A Design and

Implementation of a Wireless Iris Recognition Attendance Management System // *Information Technology and Control*. 2007. Vol. 36. No. 3.

9. Kawaguchi Y., Shoj T., Lin W., Kakusho K., Minoh M. Face Recognition-based Lecture Attendance System // *The 3rd AEARU Workshop on Network Education*. 2007.

10. Joseph J., Zakharia K.P. Automatic Attendance Management System Using Face Recognition // *IJSR*. 2013. Vol. 2. Iss. 11.

11. Jamil T. Automatic attendance recording system using mobile telephone // *19th Telecommunications Forum*. 2011.

12. Masalha F., Hirzallah N. A Students Attendance System Using QR Code // *JACSA*. 2014. Vol. 5. No. 4.

13. Иванченко Д.А. Управление мобильными технологиями в информационном пространстве современного вуза // *Высшее образование в России*. 2014. № 7. С. 93–100.

14. Самочадин А.В., Носницын С.М., Рогов П.А., Хмельков И.А. Реализация мобильных сервисов, основанных на местоположении пользователя, с помощью MDM системы // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. № 6(186). С. 27–34.

REFERENCES

1. Newman-Ford L., Fitzgibbon K., Lloyd S., Thomas S. A large-scale investigation into the relationship between attendance and attainment: a study using an innovative, electronic attendance monitoring system, *Studies in Higher Education*, 2008, No. 33(6), Pp. 699–717.

2. Cred  M., Roch S.G., Kieszczyńska U.M. Class Attendance in college. A Meta-Analytic Review of

the Relationship of Class Attendance With Grades and Student Characteristics, *Review of Educational Research*, 2010, No. 80(2), Pp. 272–295.

3. Silva F., Filipe V., Pereira A. Automatic Control of Students' Attendance in Classrooms Using RFID, *ICSNC'*, 2008, Pp. 384–389.

4. Arulogun O.T., Olatunbosun A., Fakolujo O.A., Olaniyi O.M. RFID-Based Students Attendance

Management System, *IJSER*, 2013, Vol. 4, Issue 2.

5. **Bhalla V., Singla T., Gahlot A., Gupta V.** Bluetooth Based Attendance Management System, *IJIET*, 2013, Vol. 3, Issue 1.

6. **Verma P., Gupta N.** Fingerprint Based Student Attendance System Using GSM, *IJSR*, 2013. Vol. 2, Issue 10.

7. **Rao S., Satoa K.J.** An Attendance Monitoring System Using Biometrics Authentication, *IJAR CASSE*, 2013, Vol. 3, Issue 4.

8. **Kadry S., Smaili K.** A Design and Implementation of a Wireless Iris Recognition Attendance Management System, *Information Technology and Control*, 2007, Vol. 36, No. 3.

9. **Kawaguchi Y., Shoj T., Lin W., Kakusho K., Minoh M.** Face Recognition-based Lecture Attendance System, *The 3rd AEARU Workshop on Network Education*, 2007.

10. **Joseph J., Zakharia K.P.** Automatic

Attendance Management System Using Face Recognition, *IJSR*, 2013, Vol. 2, Issue 11.

11. **Jamil T.** Automatic attendance recording system using mobile telephone, *19th Telecommunications Forum*, 2011.

12. **Masalha F., Hirzallah N.** A Students Attendance System Using QR Code, *JACSA*, 2014, Vol. 5. No. 4.

13. **Ivanchenko D.A.** Upravleniye mobilnymi tekhnologiyami v informatsionnom prostranstve sovremennogo vuza. *Vyssheye obrazovaniye v Rossii*, 2014, No 7, Pp. 93–100. (rus)

14. **Samochadin A.V., Nosnitsyn S.M., Rogov P.A., Khmelkov I.A.** Realizatsiya mobilnykh servisov, osnovannykh na mestopolozhenii polzovatelya, s pomoshchyu MDM sistemy. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2013, No. 6(186), Pp. 27–34. (rus)

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: Dmitry.raychuk@spbstu.ru

RAYCHUK, Dmitry Yu. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: Dmitry.raychuk@spbstu.ru

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

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

E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN, Alexander V. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: samochadin@gmail.com

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

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

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

ТИМОФЕЕВ, Dmitry A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

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

ЛУКИН Андрей Александрович – ведущий программист лаборатории систем управления мобильными устройствами Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: andrey.a.lukin@gmail.com

LUKIN, Andrey A. *St. Petersburg Polytechnic University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: andrey.a.lukin@gmail.com

ХМЕЛЬКОВ Игорь Александрович — *директор по консалтингу ООО «ИБС Экспертиза».*
E-mail: ikhmelkov@ibs.ru

KHMELKOV, Igor A.
E-mail: ikhmelkov@ibs.ru



УДК 004.7

А.В. Самочадин, О.И. Сужаев, Д.А. Тимофеев, П.А. Рогов

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

A.V. Samochadin, O.I. Suzhaev, D.A. Timofeev, P.A. Rogov

TOOLS FOR LOAD TESTING MOBILE DEVICE MANAGEMENT SYSTEMS

Статья посвящена разработке средств нагрузочного тестирования систем централизованного управления мобильными устройствами (систем MDM). Важное требование к системам MDM – возможность работы в условиях больших пиковых нагрузок, когда к системе одновременно обращаются несколько сотен или тысяч мобильных устройств. Проверка функционирования системы в таких условиях с помощью реальных мобильных устройств оказывается дорогой и трудоемкой. Решением является использование программных средств, моделирующих одновременную работу многих мобильных устройств. В статье сформулированы требования к программным средствам нагрузочного тестирования MDM и предложена архитектура таких средств, позволяющая моделировать большое количество разнотипных мобильных устройств и допускающая настройку на новые платформы или новые версии мобильных операционных систем.

НАГРУЗОЧНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ; АРХИТЕКТУРА; УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ.

This paper deals with the problem of load testing mobile device management (MDM) systems. MDM systems should cope with peak loads generated by hundreds and thousands of mobile devices at a time. It is too hard and expensive to test the capabilities of an MDM system with so many real devices operating simultaneously. A much more convenient approach is to use load testing software that emulates numerous mobile devices. We state a set of requirements for the software designed for load testing MDM server, and propose the architecture of a load testing tool. This architecture allows emulating the main mobile platforms (Android, iOS, Windows Phone) and can be modified to support new platforms or operating system versions.

LOAD TESTING; ARCHITECTURE; MOBILE DEVICE MANAGEMENT.

Рост использования мобильных устройств в корпоративной среде приводит к активному внедрению средств централизованного управления мобильными устройствами (mobile device management – MDM). Система MDM представляет собой программное обеспечение для работы с корпоративными системами при помощи мобильных устройств, основными функциями которого являются управление распространением программного обеспечения, управление политиками, безопасностью и предоставляемыми сервисами [1].

В корпоративной среде используются как принадлежащие организации мобиль-

ные устройства, так и собственные устройства сотрудников. При этом использование личных устройств в служебных целях (подход Bring Your Own Device) становится все более популярным. В частности, компания Gartner [2] прогнозирует, что к 2017 г. 50 % компаний будут использовать для ведения бизнеса мобильные устройства своих сотрудников. Такой подход избавляет работодателей от необходимости приобретать мобильные устройства, но в то же время препятствует формированию унифицированной среды. Требуя от сотрудника использовать личные устройства, компания имеет чрезвычайно ограниченную возмож-

ность влияния на выбор производителя устройства, используемой операционной системы, установленных на устройстве приложений. Организация корректного взаимодействия большого количества разнообразных мобильных устройств становится основной функцией корпоративной системы MDM.

При разработке программного обеспечения MDM важной задачей является проверка корректности функционирования системы в различных режимах работы. Проверка корректности включает функциональное, интеграционное и нагрузочное тестирование. Функциональное тестирование позволяет убедиться в том, что программное обеспечение правильно реализует все определенные в спецификации возможности. Цель интеграционного тестирования – проверка корректной совместной работы компонентов системы. Задача нагрузочного тестирования состоит в исследовании способности тестируемой системы выполнять свои функции при повышении интенсивности запросов к ней.

При проведении нагрузочного тестирования важно учитывать, что взаимодействие мобильного устройства и системы MDM представляет собой протяженный во времени процесс. Так как устройства пользователей не однотипны, процессы взаимодействия двух разных устройств с сервером MDM будут иметь разные свойства. Например, при реализации MDM в разных мобильных платформах используются различные протоколы, каждый из которых имеет свои временные характеристики и требует передачи разного объема данных. Как следствие, для корректного моделирования нагрузки на систему MDM необходимо учитывать особенности функционирования клиентских устройств. Сформировать необходимую нагрузку, используя реальные устройства, в ходе нагрузочного тестирования невозможно: в крупных организациях за короткий промежуток времени к серверу MDM могут обращаться сотни и тысячи устройств. Для снижения стоимости испытаний формирование тестовой нагрузки на систему выполняется с помощью специализированных программных средств, мо-

делирующих работу большого количества одновременно функционирующих мобильных устройств.

Поскольку нагрузочное тестирование широко применяется при разработке распределенных приложений, в частности, web-сервисов, существует много инструментов для формирования тестовой нагрузки (например, [3–8]). Эти инструменты по заданным правилам обращаются к сетевым сервисам, имитируя действия большого числа пользователей. Однако при тестировании системы MDM необходимо учитывать ряд особенностей, не позволяющих использовать широко распространенные инструменты нагрузочного тестирования. В данной статье анализируются требования к инструментальным средствам тестирования систем MDM и описывается архитектура такого средства.

Требования к средствам нагрузочного тестирования MDM

Для передачи данных между сервером MDM и мобильными устройствами обычно используется протокол HTTP [9, 10]. Для основанных на этом протоколе систем, таких как web-сайты или web-сервисы, разработано множество инструментальных средств нагрузочного тестирования. Однако организация нагрузочного тестирования систем MDM требует учета их специфических особенностей, что оказывается невозможным при использовании большей части существующих инструментов.

Инструментальные средства нагрузочного тестирования можно разделить на два класса: средства для тестирования систем без состояния и систем с изменяемым состоянием. К системам без состояния относятся простые web-сайты: результат обращения к странице сайта не зависит от предшествующих обращений. Для нагрузочного тестирования таких систем достаточно обеспечить одновременное поступление на сервер большого количества запросов, что достигается путем параллельного формирования запросов к фиксированному набору страниц или сервисов. К этому классу относятся системы нагрузочного тестирования `http_load` [3], `httperf` [6], `ab` [7].

Используя средства управления состоянием протокола HTTP [11], можно реализовать более сложное поведение системы, при котором результат обращения к сервису определяется не только параметрами запроса, но и его предысторией. Тестирование систем с изменяемым состоянием требует использования моделей, описывающих изменение состояния системы в зависимости от действий пользователя [12]. Поскольку при нагрузочном тестировании целью является не проверка функциональной корректности, а исследование поведения системы под нагрузкой, вместо формальных моделей системы удобно использовать заданные пользователем сценарии, которые определяют необходимую последовательность действий. К инструментам такого класса относятся, в частности, системы JMeter [4], Grinder [5], SoapUI [8].

Системы MDM являются системами с изменяемым состоянием. Простые средства нагрузочного тестирования, не поддерживающие задаваемые пользователем сценарии, могут иметь только ограниченное применение при тестировании систем MDM. Чтобы определить степень применимости инструментов, которые используют сценарии, необходимо сопоставить общие свойства web-сервисов, обладающих состоянием, и специфические свойства систем MDM.

Одним из важных свойств систем MDM является специфический набор запросов, который в общем случае зависит от набора реализованных в системе MDM сервисов и от используемых мобильных платформ. Реализованный на мобильном устройстве пользователь клиент MDM не просто формирует запросы, но и выполняет значительный объем вычислений: генерирует запросы на подпись сертификатов, шифрует данные, выполняет команды управления устройством. От выполнения этих действий зависят временные характеристики процесса взаимодействия устройств с сервером MDM. Кроме того, корректное формирование набора отправляемых данных может быть необходимо для правильного изменения состояния сервера MDM. Даже когда реализация такого набора возможностей средствами языка сценариев конкретного

инструмента нагрузочного тестирования возможна, она требует значительных усилий.

Еще одним, причем наиболее существенным, отличием системы MDM от традиционных web-сервисов является то, что не только пользователь (клиент MDM на мобильном устройстве), но и сервер MDM может выступать инициатором сеанса взаимодействия. При тестировании необходимо исследовать показатели работы системы MDM в режиме, когда взаимодействие осуществляется по инициативе сервера. Существующие системы нагрузочного тестирования такой возможности не предоставляют.

Таким образом, для организации нагрузочного тестирования сервера MDM необходимо инструментальное средство, обладающее следующими свойствами.

- Средство тестирования должно обеспечивать необходимую нагрузку на сервер MDM, моделируя одновременную работу достаточно большого количества (несколько тысяч) мобильных устройств.
- Запросы к серверу должны формироваться с учетом реалистичных сценариев взаимодействия мобильных устройств и системы MDM. Необходимо моделировать поведение всех основных мобильных платформ: Android, iOS, Windows Phone.
- Должна быть реализована возможность тестирования сервера MDM в режиме, когда он выступает в качестве инициатора сеанса взаимодействия.

Представленные на рынке системы такого класса не универсальны. Например, компания BluePoint Security предоставляет специализированный инструмент для нагрузочного тестирования систем MDM BluePoint Enterprise Edition MDM Load Simulator [13]. Он обладает нужными свойствами, однако может использоваться только вместе с системой MDM BluePoint Enterprise Edition для ее настройки и оценки производительности. Как следствие, представляется необходимой разработка собственного решения.

Перечислим более детально требования к инструментальным средствам нагрузочного тестирования систем MDM, сформу-

лированные на основе анализа существующих систем и особенностей взаимодействия сервера MDM и мобильных устройств.

- Возможность начинать сессию управления устройством по инициативе сервера.
- Возможность обрабатывать управляющие команды сервера и генерировать корректные с точки зрения протокола MDM ответы.
- Возможность корректно обрабатывать неверные запросы и команды, поступающие от сервера.
- Возможность моделировать регистрацию устройств в системе MDM.
- Возможность собирать информацию о времени отклика системы MDM при одновременно выполняемых операциях регистрации и управления устройствами.
- Возможность использовать для тестирования заранее заданные сценарии.
- Возможность оперативно изменять сценарии тестирования.

Инструмент нагрузочного тестирования должен моделировать поведение реальных мобильных устройств, выполняющих протокол взаимодействия с сервером MDM. Сценарии предназначены для выбора проверяемых наборов сервисов.

Разнообразие и быстрое развитие мобильных платформ определяют дополнительные требования к инструментальным средствам, связанные с возможностью адаптации к быстро изменяющемуся рынку мобильных платформ.

- Одновременная поддержка различных версий мобильных операционных систем.
- Возможность добавлять поддержку новых версий мобильных операционных систем и новых мобильных платформ.

Архитектура инструментального средства нагрузочного тестирования

Мы предлагаем архитектуру инструментального средства нагрузочного тестирования систем MDM, позволяющую выполнить сформулированные требования. На рис. 1 на примере одной мобильной операционной системы представлены структурная схема инструмента тестирования и его взаимодействие с сервером MDM. Компоненты, моделирующие поведение других

операционных систем, отличаются только реализацией.

Инструментальное средство состоит из следующих компонентов:

модуль тестирования, отвечающий за сбор информации о поведении системы, выявление ошибок и запуск необходимых сценариев тестирования;

модуль управления, отвечающий за выполнение сценария тестирования и проверку корректности состояния симулятора в процессе тестирования;

симуляторы мобильных операционных систем, описывающие поведение каждой конкретной версии операционной системы при взаимодействии с сервером MDM. Симулятор содержит три компонента: модуль состояния симулятора, модуль регистрации устройства и модуль команд.

Взаимодействие мобильного устройства с сервером MDM возможно в двух режимах: режиме регистрации устройства на сервере MDM и режиме выполнения команд. При регистрации данные устройства заносятся в базу данных MDM, создаются необходимые сертификаты, а на устройство устанавливается приложение-агент, с которым в дальнейшем будет взаимодействовать сервер MDM. Набор функций агента зависит от мобильной платформы. Операционные системы iOS и Windows Phone 8 уже содержат реализации протоколов MDM, позволяющие зарегистрировать устройство на сервере и выполнять базовые команды (например, блокировку устройства по команде с сервера MDM). В то же время некоторые операции, такие как определение местоположения устройства, не поддерживаются встроенным клиентом MDM и выполняются агентом. При необходимости агент запрашивает у пользователя разрешение на выполнение определенного класса операций, таких как чтение данных сервиса местоположения или доступ к списку контактов. Операционная система Android не содержит стандартной реализации протокола MDM, поэтому агент выполняет все необходимые для взаимодействия с сервером операции.

Таким образом, порядок регистрации устройства на сервере MDM будет своим

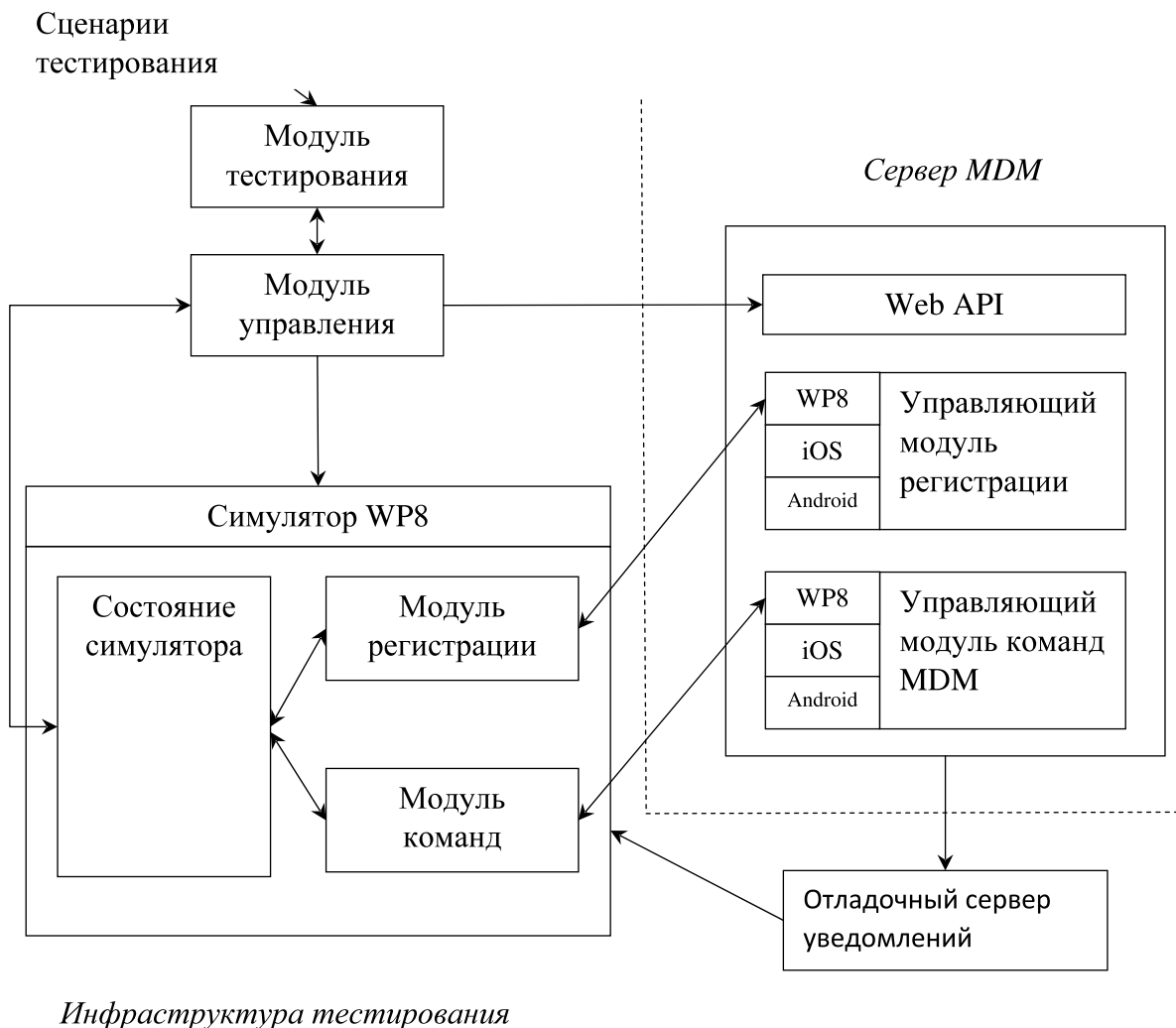


Рис. 1. Архитектура средств тестирования MDM

для каждой мобильной платформы. В режиме выполнения команд взаимодействие с устройствами производится уже по общему протоколу управления устройствами, однако содержание и, в некоторых случаях, способы представления запрашиваемых и передаваемых устройством данных различаются для разных мобильных платформ. В связи с этим в режиме команд сервер MDM также вынужден учитывать ряд специфических для платформы деталей. Таким образом, сервер MDM включает два основных модуля, отвечающих за взаимодействие с устройствами: управляющий модуль регистрации устройств и управляющий модуль команд MDM. Каждый из них включает

часть, не зависящую от конкретной мобильной платформы на клиентском устройстве, и реализации платформенно-зависимой части протокола для всех поддерживаемых мобильных платформ. Как следствие, при тестировании сервера MDM также требуется разработка отдельного симулятора для каждой поддерживаемой мобильной платформы. При этом модули команд в симуляторах разных платформ, отличаясь в деталях реализуемого протокола, оказываются в значительной степени похожими между собой, что позволяет вынести общую часть в повторно используемую библиотеку.

Еще одним важным компонентом сервера MDM является программный интерфейс

Web API. С его помощью как мобильные устройства, так и другие корпоративные сервисы могут взаимодействовать с сервером MDM при организации мобильных сервисов. Например, одна из реализуемых с помощью Web API функций состоит в публикации документов, которые затем передаются сервером MDM на мобильные устройства пользователей. Сценарии тестирования могут включать обращения к Web API для проверки функционирования и временных характеристик таких сервисов.

Система тестирования представляет собой программную библиотеку, которая может быть интегрирована с различными инструментами автоматизации тестирова-

ния. Это позволяет использовать систему тестирования в разных окружениях (ручное тестирование, автоматическое тестирование при ежедневных сборках проекта), а также использовать возможности системы не только для нагрузочного, но и для интеграционного тестирования.

Для тестирования сервера MDM необходимо разработать набор сценариев и определить конфигурацию, в которой будут проводиться тесты: набор используемых мобильных платформ и количество моделируемых устройств для каждой из них. За создание необходимой конфигурации отвечает модуль тестирования. При интеграции с инструментами автоматизации тестиро-

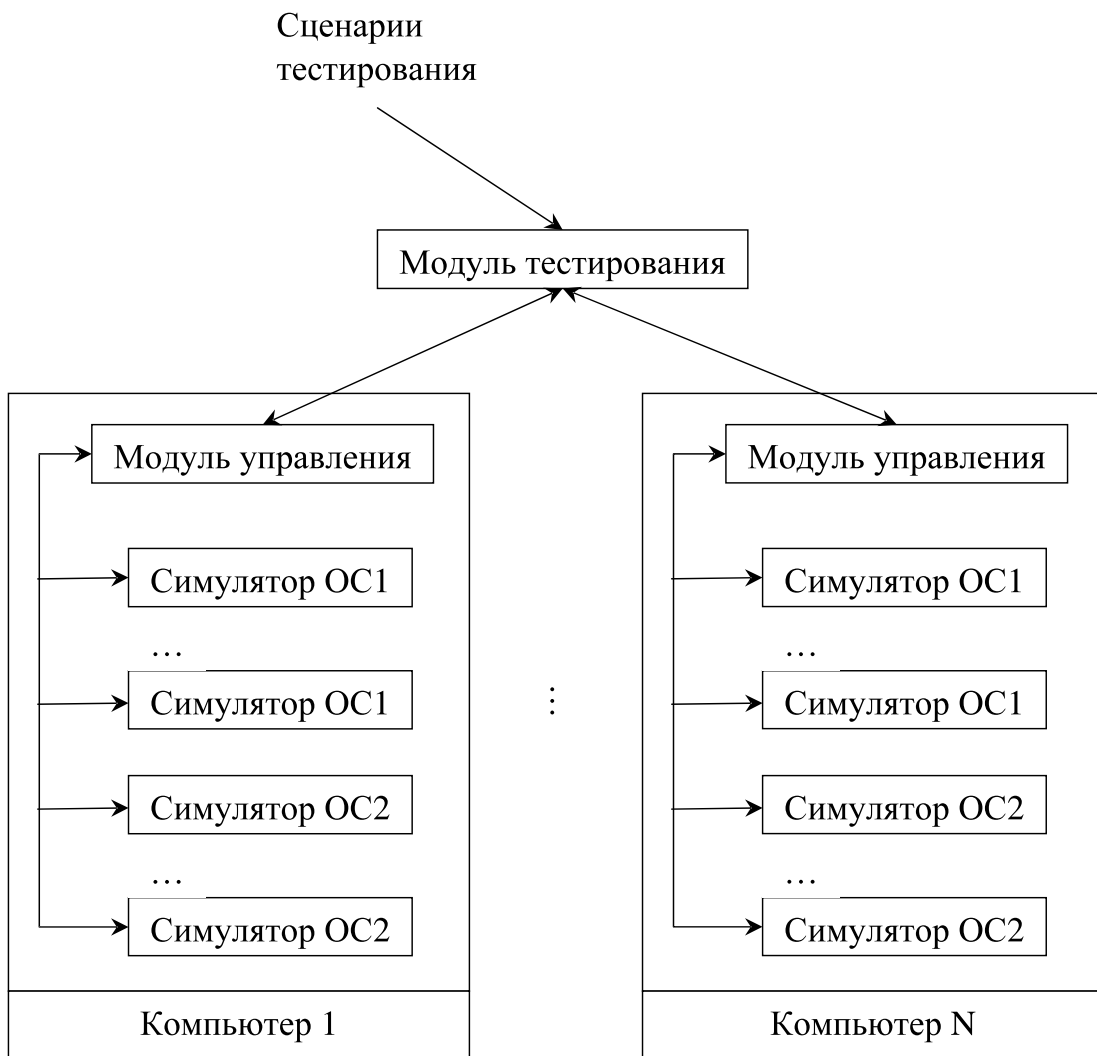


Рис. 2. Структура распределенной системы тестирования

вания может потребоваться создание нескольких вариантов модуля тестирования на основе общего библиотечного кода. В проекте в основном используется модуль тестирования, интегрированный со средой модульного тестирования NUnit.

В зависимости от планируемой нагрузки, симуляторы мобильных платформ могут быть запущены на одном или нескольких компьютерах. При запуске на одном компьютере симуляторы выполняются в виде многих потоков операционной системы в рамках процесса, создаваемого модулем тестирования, и взаимодействуют с модулем тестирования непосредственно. При использовании нескольких компьютеров процессы, выполняемые на каждом из них, взаимодействуют с модулем тестирования по сети. Структура распределенной системы тестирования представлена на рис. 2.

Модуль управления отвечает за выполнение сценариев тестирования. Он включает в себя интерпретатор языка сценариев и средства для слежения за состоянием симуляторов.

Симулятор мобильной платформы является центральным компонентом системы тестирования. Каждый экземпляр симулятора имеет собственное состояние, которое включает протокол функционирования симулятора, набор данных, описывающих моделируемое устройство, и данные, формируемые в процессе взаимодействия с сервером MDM (например, набор сертификатов). Модуль управления передает каждому экземпляру симулятора команды, которые необходимо выполнить в соответствии со сценарием, такие как «зарегистрироваться в системе MDM» или «запросить документ с заданным идентификатором», и проверяет соответствие состояния симулятора ожидаемому.

Модуль регистрации симулятора отвечает за выполнение процедуры регистрации моделируемого мобильного устройства в системе MDM. В процессе регистрации формируются уникальные элементы состояния симулятора, которые используются при дальнейшем взаимодействии симулятора и сервера MDM. Модуль команд фор-

мирует и посылает серверу MDM запросы, соответствующие описанным в сценарии действиям.

Важным требованием к системе является возможность тестирования сервера MDM в условиях, когда инициатором взаимодействия является не мобильное устройство, а сам сервер MDM. При взаимодействии с реальными мобильными устройствами для этого используется механизм push-уведомлений. Чтобы оповестить устройство о необходимом действии, сервер MDM отправляет сообщение на сервер уведомлений, а мобильное устройство периодически обращается к этому серверу, чтобы получить новые уведомления. Все три поддерживаемые мобильные платформы используют централизованные серверы уведомлений, каждый из которых поддерживается производителем платформы. Таким образом, сервер MDM взаимодействует с серверами уведомлений, принадлежащими компаниям Apple, Google и Microsoft. Взаимодействие между сервером уведомлений и мобильным устройством происходит по закрытым, уникальным для каждой платформы, протоколам. Даже при условии реализации такого протокола в симуляторе, проблематичной представляется регистрация на сервере уведомлений виртуальных мобильных устройств, которые создаются системой тестирования на короткий срок. По этим причинам вместо настоящих серверов используется отладочный сервер уведомлений, рассчитанный на взаимодействие только с симуляторами мобильных устройств. Сервер MDM взаимодействует с отладочным сервером как с официальным сервером уведомлений соответствующей мобильной платформы. Симулятор мобильного устройства периодически обращается к отладочному серверу, проверяя наличие уведомлений, и выполняет связанные с полученными уведомлениями действия.

Предложенная архитектура реализована и используется для организации нагрузочного, а также интеграционного тестирования разрабатываемой системы MDM. В настоящее время моделируются мобильные платформы Android (версии Jelly Bean 4.1.1,

4.2.2 и KitKat 4.4.2, 4.4.3), iOS версий 6.1, 7.0, 7.1 и Windows Phone 8.1.

Количество одновременно моделируемых мобильных устройств не ограничено. Эксперименты показывают, что на одном компьютере могут быть смоделированы около тысячи устройств. Более высокая нагрузка обеспечивается путем параллельного выполнения системы тестирования на нескольких соединенных в локальную сеть компьютерах.

В статье сформулированы требования к средствам инструментальной поддержки нагрузочного тестирования систем централизованного управления мобильными устройствами и предложена архитектура такого средства.

Описанная система тестирования имеет модульную архитектуру, что позволяет добавлять поддержку новых версий мобильных операционных систем, повторно используя уже реализованные общие функции, а также интегрировать систему тестирования с различными инструмента-

ми автоматизации сборки и тестирования программ. Реализация отладочного сервера уведомлений обеспечила возможность тестирования сервера MDM в сценариях, предполагающих выполнение действий по инициативе сервера. При этом для всех моделируемых мобильных платформ используется единый протокол взаимодействия между сервером уведомлений и симуляторами устройств, что упрощает добавление новых мобильных платформ.

Поскольку каждый симулятор работает независимо от других, система легко масштабируется для достижения необходимых показателей нагрузки путем запуска на нескольких компьютерах.

Разработка программного обеспечения для систем централизованного управления мобильными устройствами проводится в рамках совместного проекта компании IBS (Москва) и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 02.G25.31.0024 от 12.02.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gartner IT-Glossary, 2013 [электронный ресурс] / URL: <http://www.gartner.com/it-glossary> (дата обращения: 06.11.2014).
2. Gartner. Gartner Predicts by 2017, Half of Employers will Require Employees to Supply Their Own Device for Work Purposes, 2013 [электронный ресурс] / URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2466615> (дата обращения: 07.11.2014).
3. http_load – multiprocessing http test client [электронный ресурс] / URL: http://www.acme.com/software/http_load/ (дата обращения: 07.11.2014).
4. Apache JMeter [электронный ресурс] / URL: <http://jmeter.apache.org> (дата обращения: 07.11.2014).
5. The Grinder, a Java Load Testing Framework [электронный ресурс] / URL: <http://grinder.sourceforge.net> (дата обращения: 07.11.2014).
6. The httpperf HTTP load generator [электронный ресурс] / URL: <https://code.google.com/p/httpperf/> (дата обращения: 07.11.2014).
7. ab – Apache HTTP server benchmarking tool [электронный ресурс] / URL: <http://httpd.apache.org/docs/current/programs/ab.html> (дата обращения: 07.11.2014).
8. SoapUI. The Swiss-Army Knife of Testing [электронный ресурс] / URL: <http://www.soapui.org/About-SoapUI/what-is-soapui.html> (дата обращения: 10.11.2014).
9. [MS-MDM]: Mobile Device Management Protocol, 2014 [электронный ресурс] / URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dn392112.aspx> (дата обращения: 10.11.2014).
10. Schuetz D. The iOS MDM Protocol. BlackHat USA 2011 [электронный ресурс] / URL: https://media.blackhat.com/bh-us-11/Schuetz/BH_US_11_Schuetz_InsideAppleMDM_WP.pdf (дата обращения: 10.11.2014).
11. Barth A. RFC 6265. HTTP State Management Mechanism. IETF, 2011 [электронный ресурс] / URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6265.txt> (дата обращения: 10.11.2014).
12. Utting M., Legeard B. Practical Model-Based Testing: A Tools Approach. Morgan Kaufmann, 2006.
13. BluePoint Enterprise Edition MDM Load Simulator [электронный ресурс] / URL: <http://www.bluepointsecurity.com/presentationlayer/pages/enterpriseeditionmdmloadtester.aspx> (дата обращения: 09.11.2014).

REFERENCES

1. *Gartner IT-Glossary, 2013*. Available: <http://www.gartner.com/it-glossary> (Accessed 06.11.2014).
2. *Gartner. Gartner Predicts by 2017, Half of Employers will Require Employees to Supply Their Own Device for Work Purposes, 2013*. Available: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2466615> (Accessed 07.11.2014).
3. *http_load – multiprocessing http test client*. Available: http://www.acme.com/software/http_load/ (Accessed 07.11.2014).
4. *Apache JMeter*. Available: <http://jmeter.apache.org> (Accessed 07.11.2014).
5. *The Grinder, a Java Load Testing Framework*. Available: <http://grinder.sourceforge.net> (Accessed 07.11.2014).
6. *The httpperf HTTP load generator*. Available: <https://code.google.com/p/httpperf/> (Accessed 07.11.2014).
7. *ab – Apache HTTP server benchmarking tool*. Available: <http://httpd.apache.org/docs/current/programs/ab.html> (Accessed 07.11.2014).
8. *SoapUI. The Swiss-Army Knife of Testing*. Available: <http://www.soapui.org/About-SoapUI/what-is-soapui.html> (Accessed 10.11.2014).
9. *[MS-MDM]: Mobile Device Management Protocol, 2014*. Available: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dn392112.aspx> (Accessed 10.11.2014).
10. *Schuetz D. The iOS MDM Protocol. BlackHat USA 2011*. Available: https://media.blackhat.com/bh-us-11/Schuetz/BH_US_11_Schuetz_InsideAppleMDM_WP.pdf (Accessed 10.11.2014).
11. *Barth A. RFC 6265. HTTP State Management Mechanism. IETF, 2011*. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6265.txt> (Accessed 10.11.2014).
12. *Utting M., Legeard B. Practical Model-Based Testing: A Tools Approach*. Morgan Kaufmann, 2006.
13. *BluePoint Enterprise Edition MDM Load Simulator*. Available: <http://www.bluepointsecurity.com/presentationlayer/pages/enterpriseeditionmdmloadtester.aspx> (Accessed 09.11.2014).

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

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

E-mail: samochadin@gmail.com

SAMOCHADIN, Alexander V. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: samochadin@gmail.com

СУЖАЕВ Олег Игоревич – студент кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: oleg.suzhaev@gmail.com

SUZHAEV, Oleg I. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: oleg.suzhaev@gmail.com

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

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

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

TIMOFEEV, Dmitry A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

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

РОГОВ Петр Александрович – заместитель начальника организационного отдела научной части
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

ROGOV, Petr A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: petr.rogov@spbstu.ru

УДК 004.93'12

А.А. Хуршудов, В.Н. Марков

**СПОНТАННОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ИЕРАРХИИ ДВУМЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ
ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

A.A. Khurshudov, V.N. Markov

**UNSUPERVISED LEARNING OF HIERARCHICAL 2D FEATURES
FOR IMAGE CLASSIFICATION**

В задачах классификации и распознавания изображений одной из ключевых проблем является выделение компонентов (признаков), определяющих категорию классификации, устойчивых к инвариантным преобразованиям изображенного объекта. Предложен эффективный способ построения расширяемой многоуровневой модели, способной выделять такие признаки из обучающей выборки без использования учителя.

Рассмотрены преимущества иерархического подхода к выделению признаков и его способность к инкапсулированию структурно сложных компонентов изображения, обработка которых представляет значительные вычислительные трудности с использованием классических обучающих алгоритмов. Метод оперирует на плоских (двумерных) изображениях, но обладает потенциальной возможностью расширения для работы с трехмерными объектами. Полученная модель может использоваться в качестве детектора признаков для множества различных методов обучения, таких как сверточные нейронные сети.

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ; СПОНТАННОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ; ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИЗНАКОВ.

One of the key problems of image classification and pattern recognition domains is that of feature detection. The desired features are expected to be robust and invariant to a number of spatial transformations, compact enough to evade the «curse of dimensionality» which is a frequent obstacle when dealing with large natural images, and provide a characteristic relation to a classification category with high probability. There exists a number of approaches developed to reach the stated goals, including a variety of deep learning models, such as Restricted Boltzman Machines, convolutional networks, autoencoders, PCA, Deep Belief Networks, etc. However, most applications of the above-mentioned algorithms are often concentrated on obtaining the most accurate features for a chosen dataset rather than trying to extract the inner structure of the data. This paper suggest a slightly different approach, namely a method for building a hierarchy of meaningful features with each level composed of the features from a previous layer. Such model has multiple applications — it can serve as a composite feature detector in an unsupervised pre-training step of learning, or be itself a metric that answers the question of whether the same spatial structure is present across the dataset. The proposed approach exploits the idea of local connectivity supposing that multiple adjacent image parts which contain some meaningful features might present another, more high-level feature when composed together. We also discuss the advantages of a hierarchical feature model, such as the ability to guess a high-level feature presence by discovering a collection of low-level features concentrated in the same area, or its stability against noise and distortion which happens due to the fact that each feature level accepts a certain degree of deviation accumulating those to the top of the hierarchy. The resulting model operates

on 2D images, but can be easily extended in order to extract 3D features from a continuous data input, such as a movie, which promises to be a good way to deal with 3D transformations, which can drastically change the appearance of an object while preserving its identity.

HIERARCHICAL MODEL; DEEP LEARNING; UNSUPERVISED FEATURE LEARNING; FEATURE DETECTION.

Задача классификации объектов, представленных в виде изображений, состоит из конечного набора решений, каждое из которых соотносит выбранное изображение с соответствующей категорией классификации. Общепринятым подходом для принятия таких решений является метод выделения признаков, который используют как системы компьютерного зрения, так и естественный интеллект животных и человека [1]. Метод выделения признаков в свою очередь состоит в допущении того, что каждой категории классификации соответствуют некоторые устойчивые, повторяющиеся характеристики, которые с высокой вероятностью встречаются в изображениях, принадлежащих данной категории, и с низкой вероятностью — в изображениях других категорий. Однако по настоящее время не существует однозначного формализованного способа нахождения таких характеристик для произвольного набора категорий и изображений. Отдельную проблему представляет собой классификация изображений для задач компьютерного зрения в естественном окружении, с участием трехмерных объектов, эффектов освещения и пространственных преобразований, таких как вращение, масштабирование и трансляция. С учетом эффекта этих преобразований изображения одного и того же объекта могут значительным образом различаться цветом, формой или контурами, что существенно затрудняет распознавание. Нахождение метода выделения признаков, устойчивых к подобным преобразованиям, является глобальной задачей в области компьютерного зрения и распознавания изображений.

Иерархия признаков

Существует некоторое количество аргументов в пользу того, что эффективным кандидатом для искомого метода может быть метод построения многоуровневых

иерархий признаков, где более простые элементы изображения, такие как небольшие участки, содержащие штрихи и границы, локально (топографически) объединяются в устойчивые признаки более высокого уровня, представляющие собой контуры, геометрические фигуры и более сложные структурные компоненты. Среди свидетельств, подкрепляющих это предположение, следующие:

- в методах «глубокого обучения» («deep learning») — интенсивно развивающейся современной ветви машинного обучения — утверждается, что обучающиеся модели с преобладанием глубокой структуры, такие как многослойные нейронные сети, обладают большим потенциалом к выражению сложных, структурных признаков, которые неспособна представить одноуровневая модель [2]. Существует значительное количество алгоритмов, использующих этот подход в обучении, таких как ограниченная машина Больцмана, глубокие автоэнкодеры, сверточные нейронные сети, которые показали свою эффективность по сравнению с классическими перцептронами;

- существуют доводы в пользу того, что мозг человека и животных использует построение иерархии признаков. Так, во время классического эксперимента Хьюбела и Визеля по поиску детекторов признаков в зрительной коре головного мозга [3] были обнаружены клетки, реагирующие на определенные сочетания клеток-детекторов признаков более низшего уровня. Организаторы эксперимента сделали предположение о существовании детекторов более высокого уровня и формировании иерархии зрительных признаков.

Для построения такой иерархии необходимо решить две подзадачи:

для отдельно взятого уровня иерархии, начиная с первого, выделить признаки одинаковой структурной сложности;

сформулировать правило группировки признаков и распространения их в более высокие уровни иерархии.

Выделение признаков на отдельном уровне иерархии

Рассмотрим в качестве обучающей выборки случайным образом выбранные фрагменты изображения размера $n \times n$. Представим каждый фрагмент в виде матрицы соответствующего размера, где числа матрицы будут соответствовать интенсивности пикселей оригинального фрагмента. Предположим, что каждую такую матрицу можно представить в виде линейной суммы компонентов следующим образом:

$$x = \sum_{i=1}^c a_i x_i, \quad (1)$$

где x_i – i -я матрица размера $n \times n$; a_i – i -й коэффициент; c – количество компонентов линейной суммы, в общем случае бесконечно большое.

Добавим к этому разложению следующее условие: должно существовать минимальное конечное число коэффициентов a_i , отличных от нуля. Задача нахождения такой суммы для данной матрицы представляет собой задачу разреженной аппроксимации, которая может решаться различными способами, такими как метод по координатного спуска или метод наименьших углов (LARS) [4].

Полученные в результате матрицы x_0, x_1, \dots, x_c будут представлять собой минимальный набор функционально различных (в силу условия разреженности) компонентов, которые могут использоваться для представления любого фрагмента размера $n \times n$. Поиск такого разложения производится на выборке фрагментов оригинального изображения и с ограничением количества компонентов c некоторым эмпирически выбранным значением. Результат разложения показан на рис. 1.

При обработке небольших фрагментов изображения в результате получается набор детекторов границ, которые можно использовать в качестве примитивных признаков контура объекта. Сами по себе такие признаки малоинформативны и не несут информации, существенной для распознавания сложных объектов, однако могут послужить основой для признаков более высокого порядка [6].

Выделение признаков высокого уровня

Полученный набор компонентов позволяет представить любой фрагмент изображения размера $n \times n$ в виде вектора длиной c . Определим функции, позволяющие осуществлять преобразование фрагмента изображения в его кодированное представление, записанное в двумерном виде (в форме матрицы):

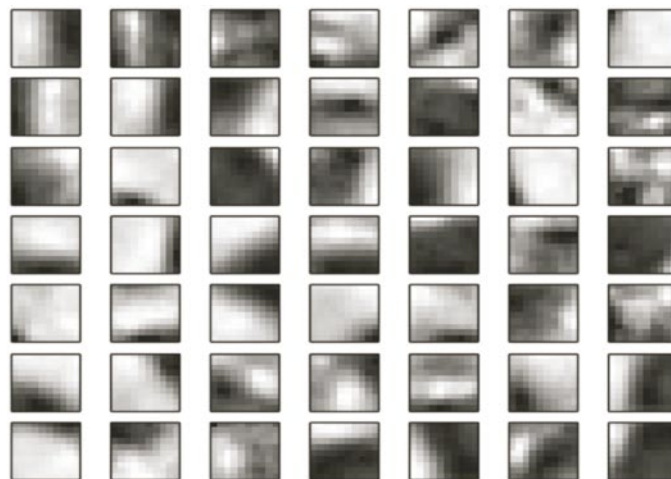


Рис. 1. Компоненты, найденные при обработке выборки фрагментов размера 10×10 (получены с использованием программного пакета scikit-learn [5])

$$\begin{aligned}
 \text{Encode} \left(\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & & & x_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix} \right) &= \\
 &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\sqrt{c}} \\ a_{21} & & & a_{2\sqrt{c}} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{\sqrt{c}1} & a_{\sqrt{c}2} & \dots & a_{\sqrt{c}\sqrt{c}} \end{pmatrix}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

а также обратное преобразование:

$$\begin{aligned}
 \text{Decode} \left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\sqrt{c}} \\ a_{21} & & & a_{2\sqrt{c}} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{\sqrt{c}1} & a_{\sqrt{c}2} & \dots & a_{\sqrt{c}\sqrt{c}} \end{pmatrix} \right) &= \\
 &= \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & & & x_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Полученные преобразования в общем случае не являются взаимно обратными. Функция *Encode* выполняется с помощью одного из семейств алгоритмов (Orthogonal matching pursuit, LASSO-LARS) [4], задачей которых является поиск наиболее точных

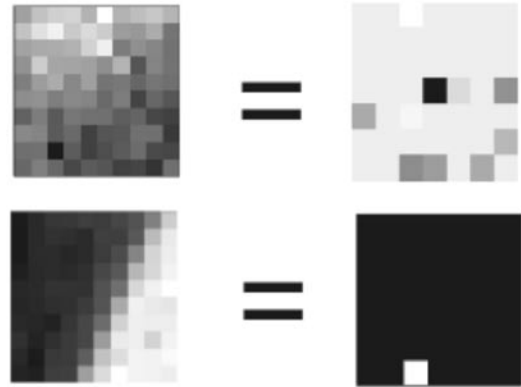


Рис. 2. Визуальное представление преобразования *Encode*

Каждый пиксель правой части представляет собой значение коэффициента a_i при соответствующем компоненте

значений коэффициентов a_i , чтобы линейная сумма соответствующих компонентов наиболее точно (с минимальным отклонением) представляла фрагмент $x_{n \times n}$. Функция *Decode* тождественна формуле (1), с учетом того, что вектор (a_1, a_2, \dots, a_c) здесь представлен в форме матрицы размера $\sqrt{c} \times \sqrt{c}$. Для обучения второго уровня иерархии выберем случайное количество фрагментов изображения размера m , где $m = kn, k \in \mathbb{Z}$, после чего к каждому из них применим следующее преобразование:

$$\begin{aligned}
 E \left(\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & & & x_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mm} \end{pmatrix} \right) &= \\
 &= \begin{pmatrix} \text{Encode} \left(\begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix} \right) & \dots & \text{Encode} \left(\begin{pmatrix} x_{1(k-1)n} & \dots & x_{1kn} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n(k-1)n} & \dots & x_{nkn} \end{pmatrix} \right) \\ \vdots & & \vdots \\ \text{Encode} \left(\begin{pmatrix} x_{(k-1)n1} & \dots & x_{(k-1)nn} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{kn1} & \dots & x_{knn} \end{pmatrix} \right) & \dots & \text{Encode} \left(\begin{pmatrix} x_{(k-1)n(k-1)n} & \dots & x_{(k-1)nkn} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{kn(k-1)n} & \dots & x_{knkn} \end{pmatrix} \right) \end{pmatrix}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

В ходе этого преобразования фрагмент $x_{m \times m}$ разбивается на k^2 малых фрагментов, каждый из которых затем представляется в кодированной форме. Визуализация процесса показана на рис. 3.

Результат преобразования составляет обучающую выборку для второго уровня иерархии признаков, после чего для полученной выборки решается соответствующая задача подбора компонентов (1). Закономер-

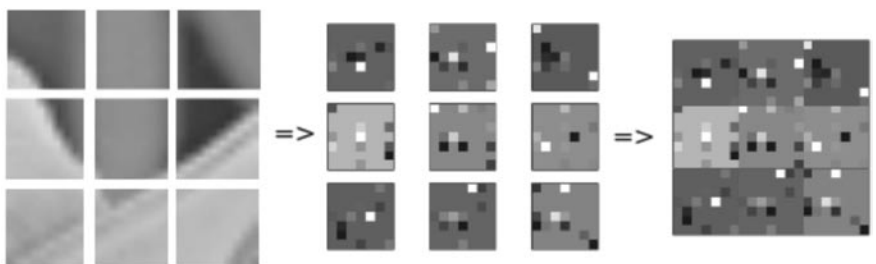


Рис. 3. Визуализация преобразования (4). Фрагмент изображения разбивается на малые фрагменты и кодируется по частям

ности взаимного расположения малых фрагментов будут сохраняться в случае перевода их в кодированное представление и, таким образом, среди преобразованных фрагментов второго уровня будут наблюдаться повторяющиеся структурные элементы, такие как сочетания признаков первого уровня: линии, углы, детали геометрических фигур. Соответствующий принцип позволяет наращивать уровни иерархии и получать признаки более высоких уровней. Тестирование метода демонстрирует способность к отысканию структурно сложных признаков, таких как контуры человеческого лица, за приемлемое время (рис. 4).

Пример демонстрирует успешное соблюдение принципа подбора эффективного числа компонентов. Сохраняется максимальная независимость признаков друг от друга: присутствуют разные формы лиц, цвет кожи, ориентация в пространстве. Любую

фотографию обучающей выборки становится возможным представить в виде композиции полученного набора признаков.

Рассмотренный метод имеет следующие достоинства:

вычислительная простота: на аналогичном наборе данных извлечение признаков с помощью иерархии локальных фрагментов изображения выполняется в среднем быстрее, чем с использованием вычислительно дорогостоящих операций, характерных для сверточных сетей и RBM;

масштабируемость: благодаря обработке локальных участков изображения метод может использоваться на изображениях любого размера. Единственное условие — возможность охватить за конечное число уровней иерархии фрагменты, содержащие искомые структурные признаки;

способность обучаться без учителя на



Рис. 4. Признаки третьего уровня иерархии, извлеченные из фотографий лиц

однородной выборке (изображений объектов одного типа). Первые уровни иерархии способны извлекать признаки даже из случайной выборки, концентрируясь на элементах геометрических форм;

эксплуатация принципов глубокого обучения — извлеченные иерархией признаки соответствуют отдельным структурным составляющим объекта. Такие признаки могут использоваться для выделения частей в сложных, составных объектах, таких как

элементы лица.

Недостаток метода на данном этапе — необходимость ручной настройки метапараметров, отвечающих за размер фрагмента и количество выделяемых компонентов.

Перспективным направлением развития является обучение на выборке различных проекций трехмерных объектов для формирования признаков, инвариантных к пространственным преобразованиям в трехмерном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Morrone M.C., Burr D.C.** Feature detection in human vision: A phase-dependent energy model // *Proc. of the Royal Society of London. Ser. B. Biological sciences.* 1988. Pp. 221–245.
2. **Bengio Y.** Learning deep architectures for AI // *Foundations and trends® in Machine Learning.* 2009. T. 2. No. 1. Pp. 1–127.
3. **Hubel D.H., Wiesel T.N.** Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *The Journal of physiology.*

1962. Vol. 160. No. 1. P. 106.

4. **Kreutz-Delgado K. et al.** Dictionary learning algorithms for sparse representation // *Neural computation.* 2003. Vol. 15. No. 2. Pp. 349–396.
5. **Pedregosa F. et al.** Scikit-learn: Machine learning in Python // *The Journal of Machine Learning Research.* 2011. Vol. 12. Pp. 2825–2830.
6. **Erhan D. et al.** Why does unsupervised pre-training help deep learning? // *The Journal of Machine Learning Research.* 2010. Vol. 11. Pp. 625–660.

REFERENCES

1. **Morrone M.C., Burr D.C.** Feature detection in human vision: A phase-dependent energy model, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 1988, Pp. 221–245.
2. **Bengio Y.** Learning deep architectures for AI, *Foundations and trends® in Machine Learning*, 2009, Vol. 2, No. 1, Pp. 1–127.
3. **Hubel D.H., Wiesel T.N.** Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex, *The Journal of physiology*,

1962, Vol. 160, No. 1, P. 106.

4. **Kreutz-Delgado K. et al.** Dictionary learning algorithms for sparse representation, *Neural computation*, 2003, Vol. 15, No. 2, Pp. 349–396.
5. **Pedregosa F. et al.** Scikit-learn: Machine learning in Python, *The Journal of Machine Learning Research*, 2011, Vol. 12, Pp. 2825–2830.
6. **Erhan D. et al.** Why does unsupervised pre-training help deep learning? *The Journal of Machine Learning Research*, 2010, Vol. 11, Pp. 625–660.

ХУРШУДОВ Артем Александрович — аспирант кафедры информационных систем и программирования Института компьютерных систем и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета.

350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2.
E-mail: art1783@gmail.com

KHURSHUDOV, Artem A. *Kuban State Technological University.*
350072, Moskovskaya Str. 2, Krasnodar, Krasnodar krai, Russia.
E-mail: art1783@gmail.com

МАРКОВ Виталий Николаевич — профессор кафедры информационных систем и программирования Института компьютерных систем и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета, доктор технических наук.

350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2.
E-mail: vinitar@yandex.ru

MARKOV, Vitaliy N. *Kuban State Technological University.*
350072, Moskovskaya Str. 2, Krasnodar, Krasnodar krai, Russia.
E-mail: vinitar@yandex.ru

УДК 681.5

С.Ф. Бурдаков, П.А. Сизов

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
В ЗАДАЧЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЯ**

S.F. Burdakov, P.A. Sizov

**THE MOBILE ROBOT MOTION CONTROL ALGORITHMS
FOR THE PURSUIT PROBLEM**

Предложены алгоритмы управления движением мобильного колесного робота в задаче преследования, которые обеспечивают выполнение цели управления при неполной информации о движении преследуемого робота. В качестве объекта управления использованы кинематические уравнения в переменных состояния, характеризующих выполнение цели управления. Линейная и угловая скорости догоняющего робота рассматриваются в качестве управлений. Линейная и угловая скорости преследуемого робота являются возмущениями неопределенного характера. Алгоритмы с обратной связью базируются на методе компенсации и классическом представлении об астатизме систем управления. При анализе устойчивости замкнутой системы и настройке алгоритмов управления использованы методы Ляпунова. Теоретические результаты подтверждены компьютерным моделированием. Приведены траектории и графики процессов в замкнутой системе при произвольных маневрах преследуемого робота. Показаны реверсивные траектории преследуемого робота, при которых догоняющий робот не достигает цели.

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ; ЗАДАЧА ПРЕСЛЕДОВАНИЯ; МЕТОД ЛЯПУНОВА; АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ; НЕПОЛНАЯ ИНФОРМАЦИЯ; РОБАСТНОСТЬ; МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The paper suggests the mobile wheeled robot motion control algorithms for the pursuit problem which allow implementing control when the information about the pursued robot motion is incomplete. Kinematic equations with state variables are used as the control target. Linear and angular velocities are considered as the pursuing robot controls. Linear and angular velocities are perturbations of uncertain nature for the pursued robot. Algorithms with feedback are based on the method of compensation and classical approach to control systems astatism. Lyapunov's methods are used in the stability analysis for the closed loop system, as well as to adjust the control algorithms. The theoretical results are confirmed by computer simulation. The trajectories and plots of the processes in the closed loop system are presented for the case of the random maneuvers of the pursued robot. There are shown the reversionary trajectories of the pursued robot in case the pursuing robot does not reach the target.

MOBILE ROBOT; PURSUIT PROBLEM; LYAPUNOV'S METHOD; CONTROL ALGORITHMS; INCOMPLETE INFORMATION; ROBUSTNESS; SIMULATION.

Задачи управления движением мобильных колесных роботов помимо теоретического значения приобретают в последнее время все большее практическое в различных областях техники и технологий. Спектр

решаемых задач при этом оказывается очень широким: от игровых задач до специальных задач обеспечения безопасности. Высокие требования к характеристикам движения роботов обуславливают необходимость ис-

пользования средств математического и компьютерного моделирования на всех этапах синтеза алгоритмов управления. При этом используются как традиционные неголономные модели роботов [1, 2], так и голономные модели, позволяющие описать такие эффекты, как проскальзывание колес, заносы и т. п. [3, 4].

В настоящей работе с использованием кинематических моделей движения рассмотрена задача преследования одного робота другим. В различных постановках похожие задачи рассматривались разными авторами. Управление неголономным мобильным роботом при слежении за предписанной траекторией на основе скользящих режимов рассмотрено в работах [5, 6]. Для решения траекторной задачи в [7] использован метод бэкстеппинга. В [8] рассмотрена задача синхронизации движения двух мобильных роботов. При этом использовались идеи методов пассивации [9] и бэкстеппинга. В отличие от известных постановок в рассматриваемую задачу внесён элемент неопределённости, связанный с неполной информацией о характеристиках движения преследуемого робота. Использование метода компенсации и классического представления об астатизме систем управления [10] позволило получить ряд новых нетри-

виальных результатов.

Постановка задачи

Рассмотрим систему, состоящую из двух мобильных колесных роботов, один из которых произвольно движется с линейной скоростью v_r и угловой скоростью ω_r , а второй, управляя линейной скоростью v и угловой скоростью ω , стремится его догнать. На рис. 1 показаны линейные и угловые координаты преследуемого x_r, y_r, θ_r и догоняющего x, y, θ роботов, а также координаты x_e, y_e, θ_e преследуемого робота в системе координат, связанной с догоняющим роботом.

Пренебрегая инерцией, запишем кинематические уравнения движения роботов в опорной системе координат OXY :

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v_r \cos \theta_r, & \dot{x} &= v \cos \theta, \\ \dot{y}_r &= v_r \sin \theta_r, & \dot{y} &= v \sin \theta, \\ \dot{\theta}_r &= \omega_r, & \dot{\theta} &= \omega. \end{aligned} \quad (1)$$

Переходя к связанной системе координат $O_e X_e Y_e$ с помощью преобразования

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix},$$

получим уравнения

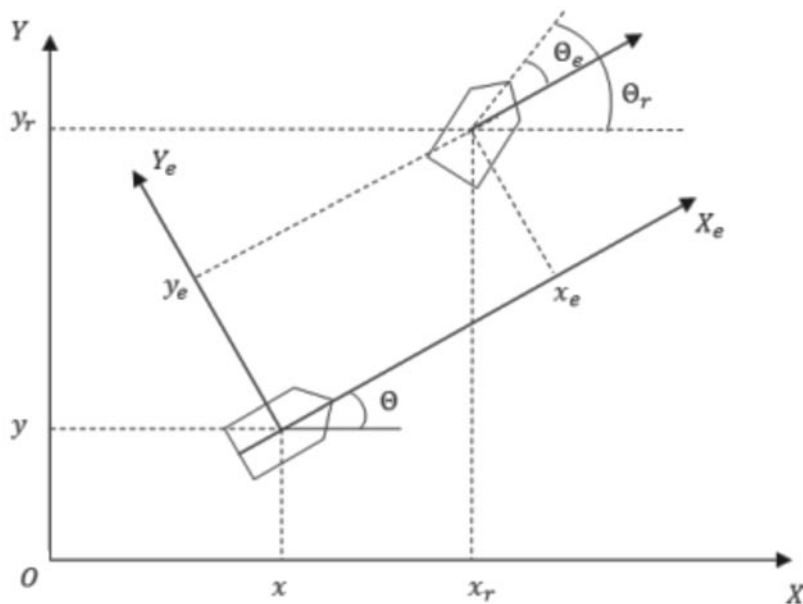


Рис. 1. Системы координат мобильных роботов

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega y_e - v + v_r \cos \theta_e, \\ \dot{y}_e &= -\omega x_e + v_r \sin \theta_e, \\ \dot{\theta}_e &= \omega_r - \omega, \end{aligned} \quad (2)$$

которые можно рассматривать, как уравнения управляемого процесса с переменными состояниями x_e, y_e, θ_e , характеризующими ошибки догоняющего робота в достижении цели, с управлениями v, ω и с возмущениями v_r, ω_r , так как заранее неизвестно, как будет двигаться преследуемый робот.

Предполагается, что скорости преследуемого и догоняющего роботов ограничены $|v_r| \leq \bar{v}_r, |\omega_r| \leq \bar{\omega}_r, |v| \leq \bar{v}, |\omega| \leq \bar{\omega}$, при этом предельные значения скоростей догоняющего робота $\bar{v}, \bar{\omega}$ превышают предельные значения скоростей преследуемого робота $\bar{v}_r, \bar{\omega}_r$.

Будем считать, что для догоняющего робота доступны измерения переменных состояния x_e, y_e, θ_e , а также имеются оценки скоростей преследуемого робота $\hat{v}_r, \hat{\omega}_r$.

Требуется для догоняющего робота построить закон управления движением с обратной связью

$$\begin{aligned} v &= v(x_e, y_e, \theta_e, \hat{v}_r, \hat{\omega}_r), \\ \omega &= \omega(x_e, y_e, \theta_e, \hat{v}_r, \hat{\omega}_r), \end{aligned} \quad (3)$$

обеспечивающий для управляемого процесса (2) асимптотическое условие $x_e \rightarrow 0, y_e \rightarrow 0, \theta_e \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Соответствующая структурная схема замкнутой системы управления (2), (3) представлена на рис. 2.

Управление при полной информации о движении преследуемого робота

Пусть помимо измерений переменных состояния x_e, y_e, θ_e имеется полная информация о скоростях преследуемого робота, то есть $\hat{v}_r = v_r, \hat{\omega}_r = \omega_r$.

По имеющейся информации сформируем закон управления движением догоняющего робота компенсационного типа с обратными связями по переменным состояния

$$\begin{aligned} v &= v_r \cos \theta_e + c_1 x_e, \\ \omega &= \omega_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e, \end{aligned} \quad (4)$$

где c_1, c_2, c_3 — настраиваемые коэффициенты обратных связей.

При подстановке управлений (4) в уравнения (2) получим уравнения для процессов в замкнутой системе:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega_r y_e - c_1 x_e + c_2 y_e^2 + c_3 y_e \theta_e, \\ \dot{y}_e &= -\omega_r x_e - c_2 x_e y_e - c_3 x_e \theta_e + v_r \sin \theta_e, \\ \dot{\theta}_e &= -c_2 y_e - c_3 \theta_e. \end{aligned} \quad (5)$$

Видно, что замкнутая система (5) имеет нулевое положение равновесия

$$x_e = 0, y_e = 0, \theta_e = 0. \quad (6)$$

Исследуем его устойчивость. Для этого составим функцию Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} \left(x_e^2 + y_e^2 + \frac{1}{\gamma} \theta_e^2 \right), \quad \gamma > 0. \quad (7)$$

Полная производная по времени от функции Ляпунова (7) на траекториях си-



Рис. 2. Структурная схема системы управления

стемы имеет вид

$$\dot{V} = -c_1 x_e^2 - \frac{1}{\gamma} c_3 \theta_e^2 - y_e \left(\frac{1}{\gamma} c_2 \theta_e - v_r \sin \theta_e \right).$$

Таким образом, асимптотическая устойчивость рассматриваемого равновесного состояния имеет место при

$$c_1 > 0, \quad c_3 > 0, \quad c_2 = \gamma v_r \frac{\sin \theta_e}{\theta_e}. \quad (8)$$

Для определения значений коэффициентов c_1, c_3 проанализируем поведение системы (5) вблизи равновесного состояния (6) при постоянных значениях v_r, ω_r . Для этого рассмотрим линеаризованные уравнения

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega_r y_e - c_1 x_e, \\ \dot{y}_e &= -\omega_r x_e + v_r \theta_e, \\ \dot{\theta}_e &= -c_2 y_e - c_3 \theta_e \end{aligned} \quad (9)$$

и соответствующее характеристическое уравнение

$$\lambda^3 + \lambda^2(c_1 + c_3) + \lambda(c_1 c_3 + c_2 v_r + \omega_r^2) + c_1 c_2 v_r + c_3 \omega_r^2 = 0. \quad (10)$$

Выберем структуру желаемого характеристического уравнения в следующем виде:

$$(\lambda + 2\xi\omega_0)(\lambda^2 + 2\xi\omega_0\lambda + \omega_0^2) = 0, \quad (11)$$

где $\omega_0 = (\omega_r^2 + \gamma v_r^2)^{1/2}$ — величина, определяющая темп желаемого движения.

Безразмерный параметр ξ является свободным. Его выбор определяет конфигурацию корней характеристического уравнения (11). В частности, при $\xi = 1$ получаются корни $\lambda_1 = -2\omega_0, \lambda_2 = -\omega_0, \lambda_3 = -\omega_0$, что соответствует при каждом ω_0 максимальной степени устойчивости системы (9). Второй свободный параметр γ определяет баланс влияния величин v_r и ω_r на скорость затухания переходных процессов в системе (9).

Характеристическое уравнение (10) приобретает желаемую структуру (11) при следующих значениях коэффициентов обратных связей:

$$c_1 = c_3 = 2\xi(\omega_r^2 + \gamma v_r^2)^{1/2}, \quad c_2 = \gamma v_r, \quad (12)$$

что полностью соответствует условиям (8).

Заметим, что из дальнейшего рассмотрения следует исключить случай $v_r = 0, \omega_r = 0$, для которого система (9) становится не полностью управляемой.

Управление при неполной информации о движении преследуемого робота

Рассмотрим более общий случай, когда $\hat{v}_r \neq v_r$ и $\hat{\omega}_r \neq \omega_r$. Закон управления (4) в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} v &= \hat{v}_r \cos \theta_e + c_1 x_e, \\ \omega &= \hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e, \end{aligned} \quad (13)$$

где $c_1 = c_3 = 2\xi(\hat{\omega}_r^2 + \gamma \hat{v}_r^2)^{1/2}, c_2 = \gamma \hat{v}_r \frac{\sin \theta_e}{\theta_e}$.

Запишем уравнения замкнутой системы (2), (13)

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= (\hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e) y_e - c_1 x_e + \Delta v_r \cos \theta_e, \\ \dot{y}_e &= -(\hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e) x_e + v_r \sin \theta_e, \\ \dot{\theta}_e &= \Delta \omega_r - c_2 y_e - c_3 \theta_e, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Delta v_r = v_r - \hat{v}_r, \Delta \omega_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$ — ошибки неполной компенсации.

Видно, что цель управления недостижима, т. к. равновесное состояние замкнутой системы (14) смещено относительно нулевого (6).

По аналогии с понятием об астатизме систем управления, робастность по компенсационным составляющим будем обеспечивать введением в закон управления (13) дополнительных интегральных слагаемых:

$$\begin{aligned} v &= \hat{v}_r \cos \theta_e + c_1 x_e + \alpha \psi_1, \\ \omega &= \hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e + \beta \psi_2, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\psi_1 = \int_0^t c_1 x_e dt; \psi_2 = \int_0^t (c_2 y_e + c_3 \theta_e) dt; \alpha$ и β — настраиваемые параметры, определяющие скорость смещения положения равновесия к требуемому.

Подставляя соотношения (15) в уравнения (2), получим уравнения замкнутой системы:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= (\hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e + \beta \psi_2) y_e - c_1 x_e - \\ &\quad - \alpha \psi_1 + \Delta v_r \cos \theta_e, \\ \dot{y}_e &= -(\hat{\omega}_r + c_2 y_e + c_3 \theta_e + \beta \psi_2) x_e + v_r \sin \theta_e, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_e &= \Delta\omega_r - c_2 y_e - c_3 \theta_e - \beta \psi_2, \\ \dot{\psi}_1 &= c_1 x_e, \\ \dot{\psi}_2 &= c_2 y_e + c_3 \theta_e. \end{aligned} \quad (16)$$

Замкнутая система (16) имеет следующее равновесное состояние:

$$\begin{aligned} x_e = 0, y_e = 0, \theta_e = 0, \psi_1 &= \Delta v_r / \alpha, \\ \psi_2 &= \Delta\omega_r / \beta. \end{aligned} \quad (17)$$

Для анализа устойчивости в малом этого положения равновесия линеаризуем систему и запишем ее характеристическое уравнение:

$$\begin{vmatrix} \lambda + c_1 & -\omega_r & 0 & \alpha & 0 \\ \omega_r & \lambda & -v_r & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & \lambda + c_3 & 0 & \beta \\ -c_1 & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & -c_2 & -c_3 & 0 & \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Значения корней $\lambda_i, i = 1..5$ характеристического уравнения (18) зависят от реальных линейной и угловой скоростей $\hat{v}_r, \hat{\omega}_r$ преследуемого робота, от их оценок $\bar{v}_r, \bar{\omega}_r$,

а также от свободных параметров $\xi, \gamma, \alpha, \beta$.

Поскольку параметры α и β имеют одинаковую размерность и определяют скорость смещения к нулевому положению равновесия по переменным x_e, y_e, θ_e , примем $\alpha = \beta$ и построим корневой годограф (рис. 3) замкнутой системы в диапазоне значений $0 \leq \alpha = \beta \leq 50$ при следующих значениях остальных величин $v_r = \bar{v}_r, \omega_r = \bar{\omega}_r, \hat{v}_r = \bar{v}_r, \hat{\omega}_r = 0, \xi = 1, \gamma = 10$.

Анализ корневого годографа характеристического уравнения (18) показывает, что при малых значениях параметра $\alpha = \beta$ в конфигурации корней имеется два корня, близких к нулю, и три корня, близких к корням желаемого характеристического уравнения (11). Дальнейшее поведение корней видно из рис. 3. Можно подобрать такое значение параметра $\alpha = \beta$, при котором обеспечивается разделение движений на «быстрое» движение типа (11) и «медленное» движение, соответствующее смещению положения равновесия замкнутой системы (16) к нулевому по координатам x_e, y_e, θ_e . На рис. 3 подобная конфигурация корней

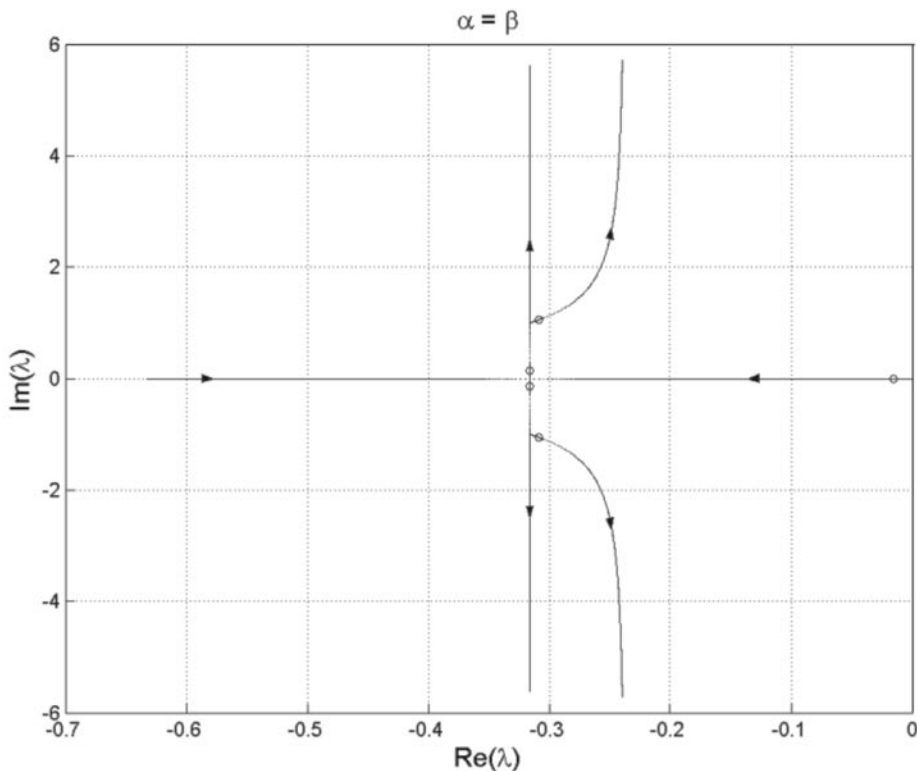


Рис. 3. Корневой годограф замкнутой системы

при $\alpha = \beta = 0,19$ обозначена кружками. Таким образом, имеет место локальная асимптотическая устойчивость равновесного состояния (17) замкнутой системы (16).

Заметим, что по управлениям (15) вблизи равновесного состояния можно уточнять оценки линейной и угловой скоростей $\hat{v}_r, \hat{\omega}_r$

преследуемого робота в соответствии с выражениями $v \approx v_r, \omega \approx \omega_r$ и затем корректировать коэффициенты обратных связей c_1, c_2, c_3 , приближая их к значениям (12).

Устойчивость равновесного состояния замкнутой системы (16) при произвольных $v_r(t), \omega_r(t)$, больших начальных рас-

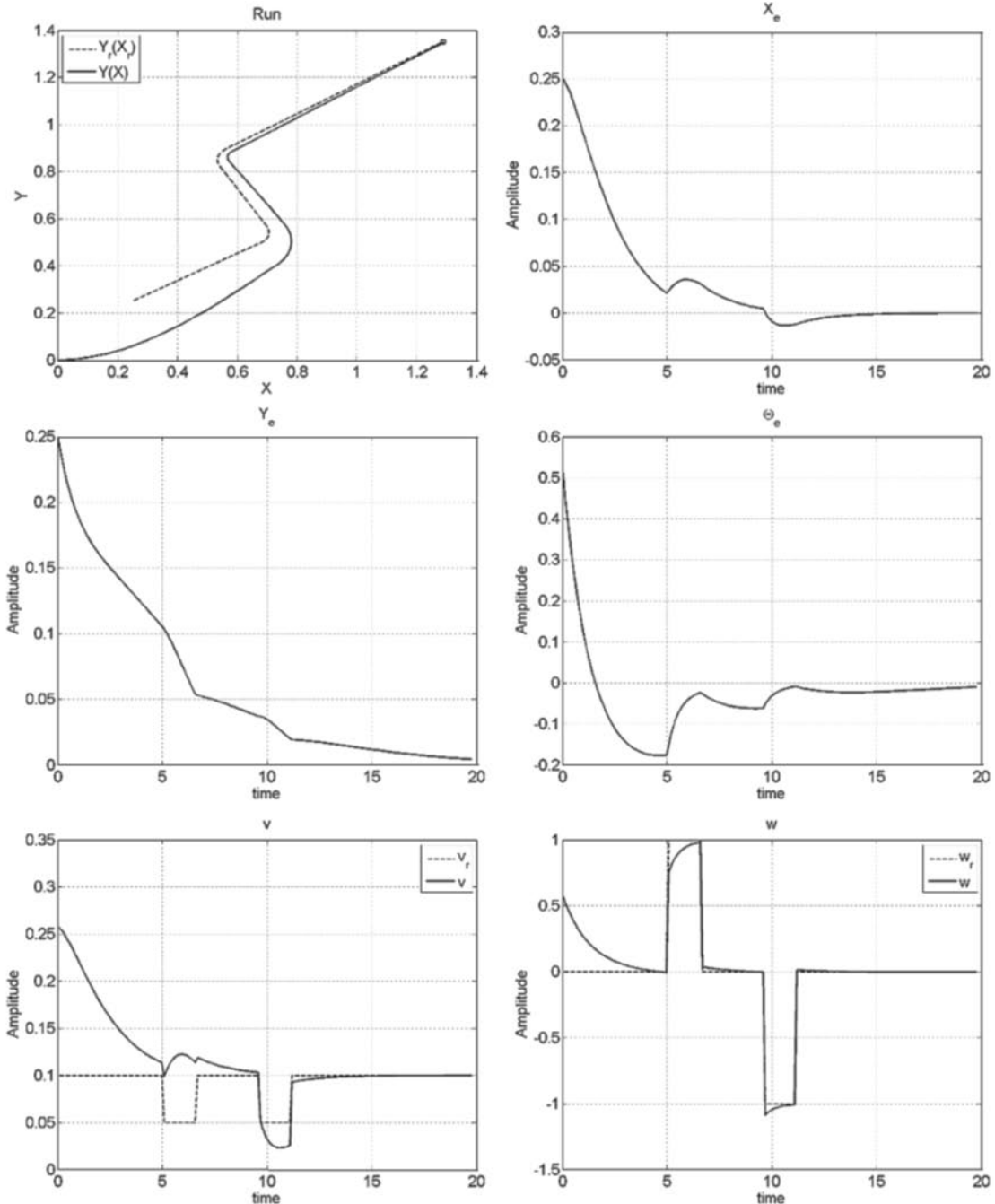


Рис. 4. Траектории движения роботов и графики процессов при полной информации о движении преследуемого робота



согласованиях и ограничениях на значения управлений v, ω анализировалась при компьютерном моделировании.

Результаты моделирования

Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и позволили уточ-

нить некоторые особенности движения догоняющего робота.

1. При полной информации о движении преследуемого робота моделировались процессы в замкнутой системе (5) при $\xi = 1, \gamma = 10$ и различных начальных условиях. Рассматривались равномерное прямоли-

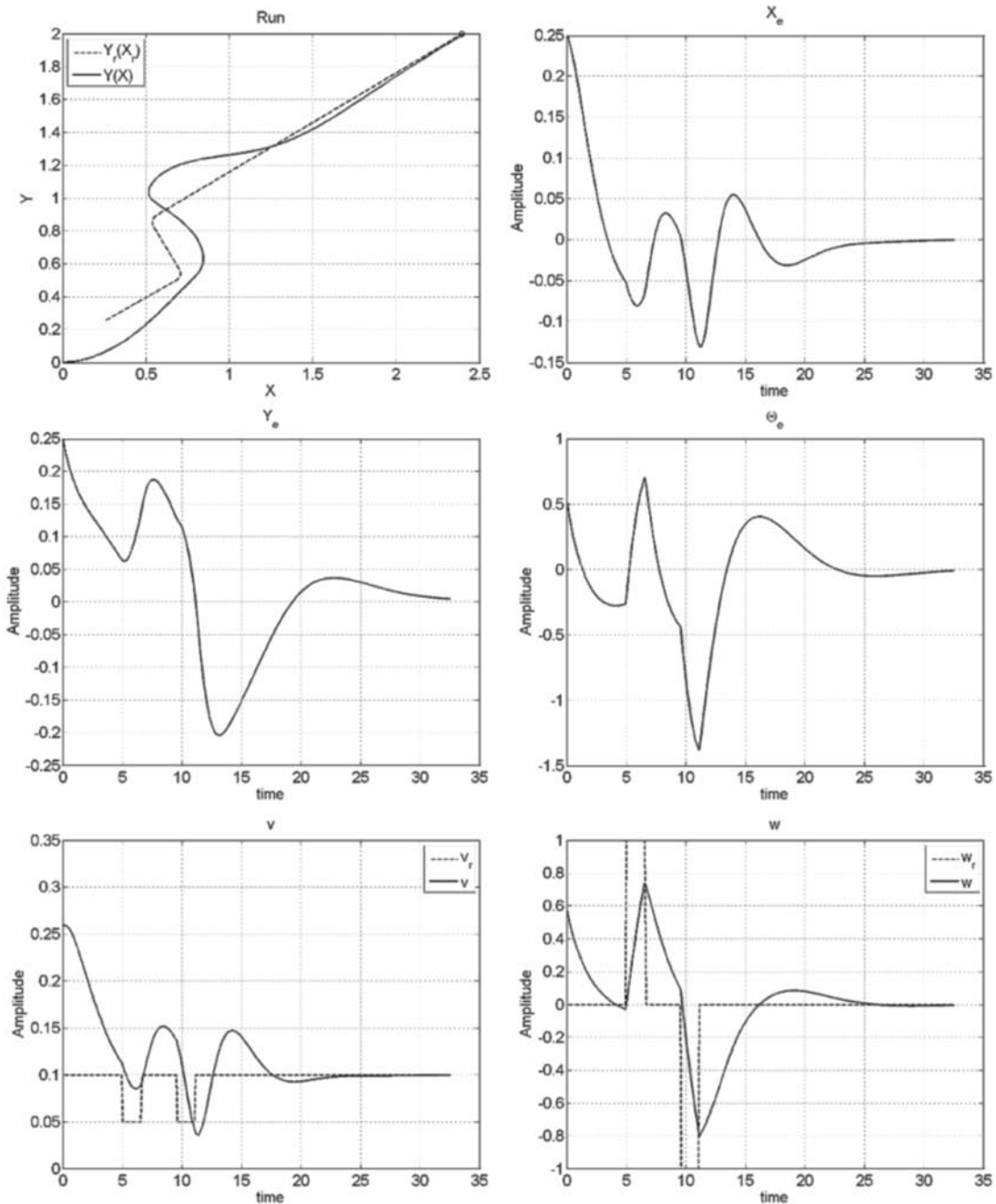


Рис. 5. Траектории движения роботов и графики процессов при неполной информации о движении преследуемого робота

нейное движение преследуемого робота $v_r = \text{const}$, $\omega_r = 0$, равномерное движение по окружности $v_r = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$, а также различные маневры преследуемого робота с $v_r = v_r(t)$, $\omega_r = \omega_r(t)$. Цель управления достигалась во всех случаях, но с разным быстродействием. Достижение цели фиксировалось при попадании догоняющего робота в зону $|x_e| \leq 10^{-3}$, $|y_e| \leq 10^{-3}$, $|\theta_e| \leq 10^{-3}$.

В целом траектории движения догоняющего робота при приемлемом быстродействии отличались гладкостью. Однако имели место и некоторые особенности. Например, при прямолинейном движении преследуемого робота и начальных условиях по углу θ_e близких к $\theta_e(0) = \pm\pi$ на траекториях догоняющего робота появлялся характерный излом, показывающий, что догоняющий робот сначала движется задним ходом, а затем после остановки вы-

ходит на траекторию преследуемого робота и достигает его.

На рис. 4 приведены траектории $y_r = y_r(x_r)$ преследуемого робота (пунктирная линия) и $y = y(x)$ догоняющего робота в опорной системе координат OXY , а также графики всех процессов для следующего маневра преследуемого робота. В начальный момент времени $t = 0$ он движется прямолинейно с постоянной скоростью $v_r = \bar{v}_r = 0,1$. Затем на пятой секунде движения он поворачивает влево на угол $\pi/2$ с постоянной угловой скоростью $\omega_r = \bar{\omega}_r = 1$. Далее преследуемый робот три секунды движется прямолинейно со скоростью \bar{v}_r , а затем с угловой скоростью $\bar{\omega}_r$ поворачивает в противоположную сторону на тот же угол $\pi/2$ и выходит на траекторию, параллельную начальной.

Были приняты следующие начальные

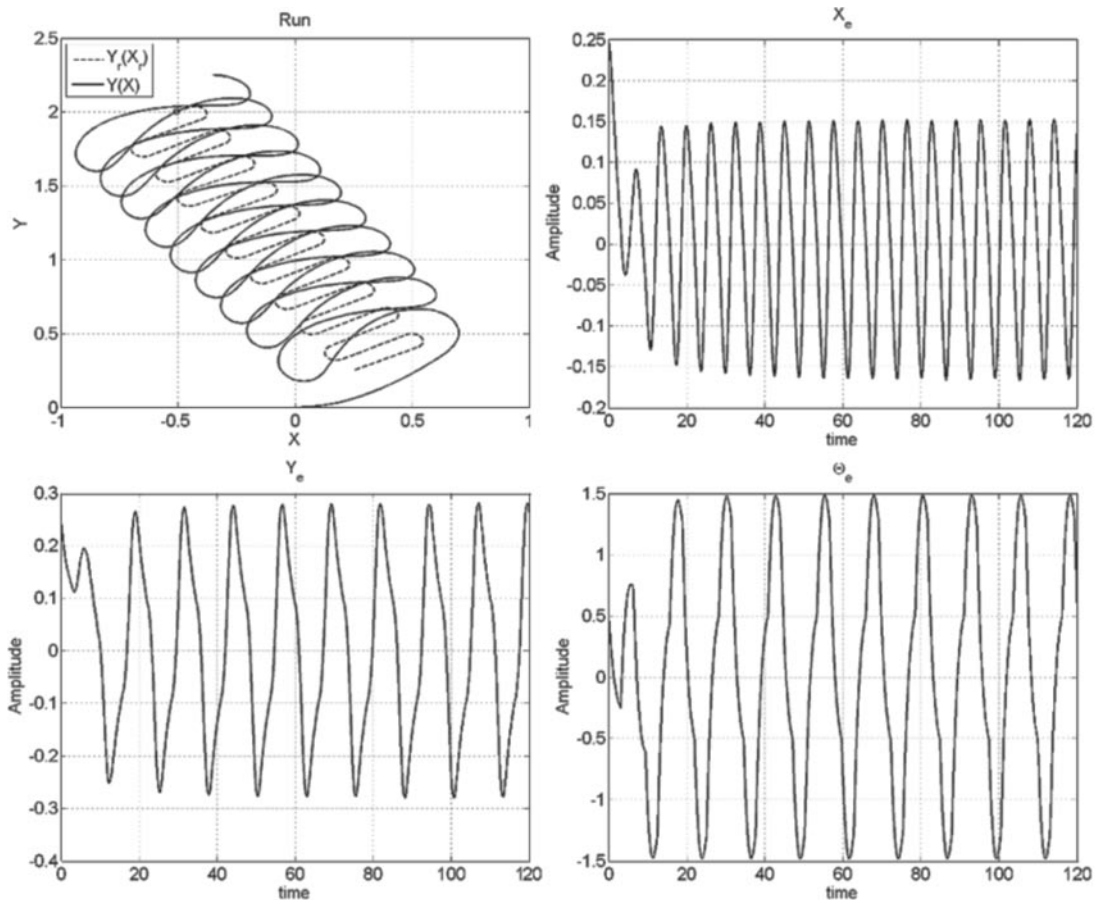


Рис. 6. Траектории движения роботов и графики процессов при реверсивных движениях преследуемого робота



условия для преследуемого и догоняющего роботов:

$$\begin{aligned}x_r(0) &= 0,25, & x(0) &= 0, \\y_r(0) &= 0,25, & y(0) &= 0, \\ \theta_r(0) &= \pi/6, & \theta(0) &= 0.\end{aligned}$$

По результатам моделирования быстродействие определялось величиной $t^* = 19,77$. При этом управления v, ω не превышали следующих максимальных значений: $v_{\max} = 0,26$, $\omega_{\max} = 1,09$.

2. При неполной информации о движении преследуемого робота моделировались процессы в замкнутой системе (16).

На рис. 5 приведены траектории движения роботов и графики процессов достижения цели для описанного выше (см. п. 1) маневра преследуемого робота. Дополнительно были введены следующие данные: $\hat{v}_r = \bar{v}_r = 0,1$, $\hat{\omega}_r = 0$, $\alpha = \beta = 0,19$, $\psi_1(0) = 0$, $\psi_2(0) = 0$.

Видно, что цель достигается и в этом случае, однако за больший промежуток времени $t^* = 32,53$. При этом управления не превышали следующих максимальных значений: $v_{\max} = 0,26$, $\omega_{\max} = 0,80$.

При моделировании процессов в замкнутой системе (16) с настройками закона управления (15), соответствующими разделению движений, наблюдалась медленная сходимость процессов для круговых траекторий движения преследуемого робота. Это позволило предложить реверсивные траектории преследуемого робота, при которых догоняющий робот, не отработав предыдущих маневров, втягивался в периодическое движение, не приводящее к цели (рис. 6).

Моделирование процессов при введении ограничений на управления v, ω в достаточно широком диапазоне настроек закона управления приводило лишь к снижению быстродействия, не влияя на устойчивость замкнутой системы (16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Canudas de Wit C., Siciliano B., Bastin G. (Eds). *Theory of Robot Control*. London: Springer – Verlag, 1996. 392 p.
2. Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2005. Т. 11. № 8. С. 29–80.
3. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб.: Наука, 2001. 227 с.
4. Коньков В.Г., Андриков Д.А., Кулаков Б.Б. Синтез интеллектуализированной системы торможения колесного транспортного средства // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение*. 2008. № 2. С. 3–26.
5. Aguilar L.E., Tamel T., Soueres P. Robust Path Following Control for Wheeled Robots via Sliding Mode Techniques // *Proc. IEEE/RSI Int. Conf. Intell. Robot Syst.* 1997. Pp. 1389–1395.

6. Dongkyoung Chwa et al. Sliding Mode Tracking Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots // *Proc. ACC.* 2002. Pp. 3991–3996.
7. Jiang Zhong-Ping, Nijmeijer H. Tracking Control of Mobile Robots: A Case Study in Backstepping // *Automatica*. 1997. Vol. 33. No. 7. Pp. 1393–1399.
8. Усик Е.В. Синхронизация нелинейных систем Лурье на основе пассивации и бэкстеппинга // *Автоматика и телемеханика*. 2012. № 8. С. 35–48.
9. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации // *Автоматика и телемеханика*. 2006. № 11. С. 33–37.
10. Первозванский А.А., Фрейдович Л.Б. Об астатизме нелинейных систем // *Автоматика и телемеханика*. 1998. № 7. С. 35–43.

REFERENCES

1. Canudas de Wit C., Siciliano B., Bastin G. (Eds). *Theory of Robot Control*. London: Springer – Verlag, 1996, 392 p.
2. Martynenko Yu.G. Upravlenie dvizheniem mobilnykh kolesnykh robotov [Motion control of mobile wheeled robots], *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika*, 2005, Vol. 11, No. 8, Pp. 29–80. (rus)
3. Burdakov S.F., Miroshnik I.V., Stelmakov R.E.

- Sistemy upravleniya dvizheniem kolesnykh robotov*. St. Petersburg: Nauka Publ., 2001, 227 p. (rus)
4. Konkov V.G., Andrikov D.A., Kulakov B.B. Sintez intellektualizirovannoy sistemy tormozeniya kolesnogo transportnogo sredstva, *Vestnik MGTU imeni N.E. Bauman. Priborostroenie*, 2008, No. 2, Pp. 3–26. (rus)
5. Aguilar L.E., Tamel T., Soueres P. Robust

Path Following Control for Wheeled Robots via Sliding Mode Techniques, *Proc. IEEE/RSI Int. Conference, Intell. Robot Syst*, 1997, Pp. 1389–1395.

6. **Dongyoung Chwa et al.** Sliding Mode Tracking Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots, *Proc. ACC*, 2002, Pp. 3991–3996.

7. **Jiang Zhong-Ping, Nijmeijer H.** Tracking Control of Mobile Robots: A Case Study in Backstepping, *Automatica*, 1997, Vol. 33, No. 7, Pp. 1393–1399.

8. **Usik E.V.** Синхронизация нелинейных систем Лурье на основе пассификации и бекстеппинга

[Synchronization of Nonlinear Lur'e Systems Using Passification and Backstepping], *Avtomatika i telemekhanika*, 2012, No. 8, Pp. 35–48. (rus)

9. **Andrievskii B.R., Fradkov A.L.** Metod пассификации в задачах адаптивного управления, отсенивания и синхронизации [Method of passification in adaptive control estimation and synchronization], *Avtomatika i telemekhanika*, 2006, Vol. 67, No. 11, Pp. 1699–1737. (rus)

10. **Pervozvanskii A.A., Freudovitch S.F.** Об астатизме нелинейных систем [On the astatism of nonlinear systems], *Avtomatika i telemekhanika*, 1998, No. 7, Pp. 35–43. (rus)

БУРДАКОВ Сергей Федорович – профессор кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

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

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

BURDAKOV, Sergey F. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

СИЗОВ Павел Александрович – студент кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

E-mail: p.a.sizov@gmail.com

SIZOV, Pavel A. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: p.a.sizov@gmail.com



УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

СИНТЕЗ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

N.V. Rostov

SYNTHESIS AND MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF NONLINEAR QUASI TIME-OPTIMAL DIGITAL CONTROLLERS

Изложена методика синтеза и многокритериальной параметрической оптимизации позиционных следящих систем с квазиоптимальными по быстродействию цифровыми регуляторами на основе компьютерного зондирования и выбора Парето-оптимальных настроек их параметров. Приведен пример оптимизации нелинейного цифрового регулятора следящей системы с линейным объектом управления.

ПОЗИЦИОННЫЕ СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ; КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ; СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ; МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ; ЗОНДИРОВАНИЕ; ПАРЕТО-РЕШЕНИЯ.

In this paper some formulations of synthesis and multiobjective parameter optimization problems of digital servo systems with quasi time-optimal controllers are discussed and computer-aided techniques based on searching the Pareto-solutions are proposed. A practical example is given to demonstrate the multiobjective parameter tuning of nonlinear digital controller for servo system with linear plant.

ROBOT MOTION CONTROL SYSTEMS; INVERSE KINEMATIC PROBLEMS; ITERATIVE METHODS; ALGORITHM CONVERGENCE; REGULARIZATION.

Для позиционных следящих систем отработка входных воздействий и внешних возмущений ступенчатого вида являются характерными режимами их работы, в которых требуется обеспечивать максимально возможное быстродействие динамических процессов при отсутствии перерегулирования и высокую статическую точность. В многоконтурных следящих системах во внутренних контурах момента и скорости обычно применяются линейные ПИ и ПИД-регуляторы, обеспечивающие стабилизацию процессов при действии нестационарных параметрических и внешних возмущений. Регуляторы внешних контуров положения с линейными или нелинейными структурами ответственны за точность, быстродействие и качество переходных процессов управления выходными координатами. Их синтез часто проводят по упрощенным моделям объектов управления (ОУ), включающим

в себя линеаризованные модели предварительно оптимально настроенных (синтезированных) замкнутых контуров скорости.

Математически синтез нелинейного оптимального по быстродействию цифрового управления формулируется как задача перевода вектора состояния объекта управления $X[n+1] = A \cdot X[n] + B \cdot u[n]$ из начального положения $X(0)$ в конечное $X(N) = 0$ за минимальное число периодов дискретности переходного процесса и нахождения соответствующего управления $u[n]$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, минимизирующего критерий $J(u) = N$ с учетом ограничений на амплитуду управления $|u[n]| \leq U_0$ [1]. В такой постановке задача синтеза решается методами, базирующимися на принципе максимума или динамического программирования [1, 2, 8, 9].

Однако синтезированный теоретическими методами алгоритм оптимального

управления в виде нелинейной функции непрерывного или дискретного времени требует измерения или наблюдения полного вектора состояния объекта. Получить аналитические выражения для оптимального регулятора в замкнутой системе можно только для линейных объектов второго или третьего порядка [2, 3]. Для систем с линейными ОУ более высокого порядка и нелинейными объектами возможен лишь синтез квазиоптимальных регуляторов [4, 7]. Однако на практике из-за противоречивости критериев, оценивающих показатели динамических процессов в контуре положения, возникающих при действии входных и возмущающих воздействий, приходится осуществлять компромиссную настройку параметров таких нелинейных регуляторов.

В [5] изложена методика последовательной многокритериальной (МК) оптимизации нелинейных цифровых систем автоматического управления (САУ) с итерационной скалярной оптимизацией на начальных этапах для локализации Парето-области, проведением зондирования пространства параметров регулятора и выбором решений в ограниченной ее окрестности. В [6] предложена методика многокритериальной настройки параметров типовых цифровых регуляторов ПИ и ПИД-типа в системах стабилизации и следящих системах в различных динамических режимах с учетом нелинейностей и при действии внешних возмущений.

Ниже рассматриваются постановки задач структурно-параметрического синтеза цифровых регуляторов, квазиоптимальных по быстродействию, формулируются критерии для их векторной оптимизации и предлагается методика поиска Парето-оптимальных настроек параметров таких нелинейных регуляторов на основе прямого зондирования с оцениванием показателей переходных процессов в цифровых следящих системах при действии входных и внешних возмущений по результатам дискретно-непрерывного моделирования. При оптимизации следует также учитывать нелинейности в ОУ и особенности цифровой реализации регуляторов. Применен-

ные методики иллюстрируются на примере Парето-оптимальной настройки параметров регулятора положения цифровой следящей системы с линейным объектом управления третьего порядка.

Задачи структурно-параметрического синтеза квазиоптимальных цифровых регуляторов. Управление будет приближенно оптимальным в смысле критерия максимального быстродействия в тех случаях, когда:

- синтез системы проведен с использованием редуцированной линейной модели объекта управления;
- алгоритм управления, полученный в результате синтеза, упрощен при его реализации;
- при синтезе системы изначально выбрана упрощенная структура регулятора.

В последнем случае математическая строгость задачи оптимального синтеза снижается, т. к. структура регулятора выбирается заранее из конечного множества возможных вариантов.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют следующие два подхода к синтезу квазиоптимальных цифровых регуляторов.

Дискретизация оптимального регулятора, синтезированного для редуцированного линейного объекта управления. Алгоритм непрерывного оптимального по быстродействию регулятора имеет вид

$$u(t) = U_0 \cdot \text{sign}S(e(t), \bar{y}(t)), \quad (1)$$

где $e(t)$ – ошибка системы; $\bar{y} = (\dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(m-1)})^T$ – вектор производных выходной координаты; $S(e, \bar{y})$ – поверхность переключения; $U_0 = \text{const}$.

Для линейных объектов управления второго порядка ($m = 2$) аналитическая линия переключения проста для реализации и, если период дискретности T_0 достаточно мал, то при конечно-разностной аппроксимации производных в алгоритме (1) дискретный алгоритм будет обеспечивать процессы, близкие к оптимальным.

В случае линейных объектов управления высокого порядка и нелинейных объектов предпочтительнее второй подход.

Синтез дискретного квазиоптимального регулятора с упрощенной структурой. Алго-

ритм такого регулятора может иметь следующий вид:

$$u[n] = U_0[n] \cdot \text{sign} S_a(e[n], \bar{y}[n]), \quad (2)$$

где $\bar{y}[n] = (\nabla y[n], \dots, \nabla^{m-1} y[n])^T$ – вектор разностей выходной координаты; $S_a(e[n], \bar{y}[n])$ – аппроксимированная поверхность переключения.

При релейном цифровом управлении, когда $U_0[n] = \text{const}$, обычно возникают нежелательные колебания выходной координаты ОУ при пересечениях фазовой траекторией поверхности переключения и в окрестности начала фазовых координат. Используя управление, при котором $U_0[n] = \text{var}$, можно минимизировать или полностью исключить такие колебания.

В общем случае предполагается, что для алгоритма (2) поверхность переключения определяется сначала в табличной форме по результатам моделирования ОУ, а затем аппроксимируется квадратичной, кубической или более сложной нелинейной поверхностью [2].

Структурная схема цифровой следящей системы с квазиоптимальным по быстродействию регулятором представлена на рис. 1, где $g[n]$, $y[n]$ – входное воздействие и выходная координата; $e[n]$ – ошибка системы; $f(t)$ – внешнее возмущение.

Цифровой регулятор содержит: РБ – разностный блок; ФП – функциональный преобразователь; РЭ – релейный элемент; Э₀ – фиксатор (экстраполятор нулевого порядка); T_0 – период квантования сигналов по времени.

Этапы синтеза квазиоптимальных цифро-

вых регуляторов. Компьютерный синтез регулятора включает в себя следующие пять этапов.

1. Дискретизация непрерывной модели объекта управления. Дискретная модель объекта позволяет определять поверхность переключения непосредственно в пространстве дискретных фазовых координат без конечно-разностной аппроксимации производных.

2. Определение поверхности переключения в табличной форме. В качестве такой поверхности может быть выбрано семейство фазовых траекторий объекта, проходящих через начало координат, определяемых путем дискретного моделирования ОУ при ненулевых начальных условиях.

3. Аппроксимация табличной поверхности переключения. С точки зрения упрощения реализации регулятора практический интерес представляет квадратичная аппроксимация поверхности переключения:

$$S_a(e[n], \bar{y}[n]) = e[n] - \beta_1^T \bar{y}[n] - \bar{y}^T[n] \beta_{II} \bar{y}[n], \quad (3)$$

где β_1 – $(m-1)$ -вектор и β_{II} – $(m-1) \times (m-1)$ -матрица коэффициентов, которые могут быть определены, например, регрессионным методом.

В частности, квадратичная линия переключения, симметричная относительно начала координат $e[n]$ и $\nabla y[n]$, имеет вид

$$S_a(e[n], \nabla y[n]) = e[n] - \beta_1 \cdot \nabla y[n] - \beta_2 \cdot (\nabla y[n] \cdot |\nabla y[n]|), \quad (4)$$

где параметры β_1 и β_2 можно найти, решая соответствующую систему алгебраических уравнений с прямоугольной матрицей

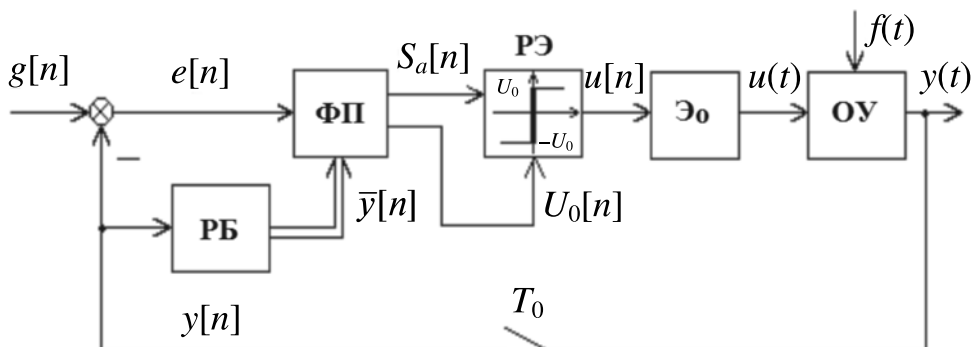


Рис. 1. Структурная схема квазиоптимальной цифровой следящей системы

$$A_{vy} \cdot X = B_e, \quad (5)$$

где

$$X = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix};$$

$$A_{vy} = \begin{pmatrix} \nabla y[1] & \nabla y[1] \cdot |\nabla y[1]| \\ \dots & \dots \\ \nabla y[N] & \nabla y[N] \cdot |\nabla y[N]| \end{pmatrix};$$

$$B_e = \begin{pmatrix} e[1] \\ \dots \\ e[N] \end{pmatrix}.$$

Регрессионная $N \times 2$ -матрица A_{vy} и N -вектор B_e составляются по табличным данным. Псевдорешение переопределенной системы (5) имеет следующий вид:

$$X = (A_{vy}^T \cdot A_{vy})^{-1} \cdot A_{vy}^T \cdot B_e.$$

Ошибка аппроксимации будет зависеть не только от кривизны фазовых траекторий объекта, но и от обусловленности матрицы $(A_{vy}^T \cdot A_{vy})$.

4. Модификации структуры цифрового регулятора. Выбирая тот или иной вариант изменения амплитуды релейного элемента $U_0[n]$ в фазовом пространстве, можно получать разные алгоритмы квазиоптимальных регуляторов.

- Управляющее воздействие можно уменьшать по мере приближения к началу фазовых координат

$$U_0[n] = K_0 \cdot (|e[n]| + |\nabla y[n]| + \dots + |\nabla^{m-1} y[n]|), \quad (6)$$

в простейшем варианте $U_0[n] = K_0 \cdot |e[n]|$.

- Более «мягкое» управление в окрестности поверхности переключения можно получать, когда

$$U_0[n] = K_0 \cdot |S_a(e[n], \bar{y}[n])|,$$

что эквивалентно аппроксимации релейного элемента нелинейной функцией saturation (насыщение)

$$u[n] = \text{sat}(K_0 \cdot S_a(e[n], \bar{y}[n])), \quad (7)$$

где K_0 – коэффициент передачи на ее линейном участке с ограничением модуля управляющего воздействия $u[n]$ на заданном уровне U_{\max} .

5. Параметрическая оптимизация ре-

гулятора. Из-за ошибок аппроксимации поверхности переключения, а также для исключения нежелательного скользящего режима, необходима оптимизация параметров квазиоптимального регулятора итерационными численными методами с использованием линейной или нелинейной модели ОУ. Предварительную оптимизацию можно проводить по интегральным критериям, а заключительную многокритериальную – по совокупности показателей переходных процессов в замкнутой цифровой следящей системе.

Постановка задачи МК-оптимизации цифровых квазиоптимальных по быстродействию следящих систем. В зависимости от назначения следящей системы векторные критерии могут состояться из различных пар частных критериев $F_i(\theta) = [f_1, f_2]^T$, зависящих от значений θ – вектора настраиваемых параметров регулятора.

Векторный критерий может включать в себя интегральные квадратичные оценки переходного процесса произвольного вида, вычисляемые в дискретном времени:

$$F_1(\theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N e^2[n], \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N u^2[n] \right] \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $e[n] = (g[n] - y[n])$ – ошибка системы; $u[n]$ – управляющее воздействие; N – число периодов дискретности протекания переходного процесса. Первый частный критерий косвенно оценивает быстродействие системы, а второй – энергозатраты на управление.

В следящих системах должны оцениваться прямые показатели переходного процесса по входному воздействию:

$$F_2(\theta) = [T_g, \sigma]^T \rightarrow \min, \quad (9)$$

где T_g – время переходного процесса; σ – перерегулирование. Но в случаях сильно колебательной или расходящейся переходной характеристики системы они не могут быть определены по результатам моделирования.

Векторный критерий должен содержать также оценки показателей инвариантности системы, определяемых при действии ступенчатого внешнего возмущения:

$$F_3(\theta) = [T_f, |e_f|_{\max}]^T \rightarrow \min, \quad (10)$$

где T_f – время переходного процесса по возмущению; $|e_f|_{\max}$ – соответствующая максимальная динамическая ошибка.

Указанные выше критерии необходимо оценивать при проведении зондирования динамики в пространстве параметров регуляторов с моделированием процессов в цифровой следящей системе в следующих двух режимах:

- при ступенчатом входном воздействии $g[n]$ и нулевом внешнем возмущении $f(t)$;
- при действии ступенчатого внешнего возмущения $f(t)$.

В конкретных задачах оптимизации полный векторный критерий может формироваться из разных комбинаций пар частных критериев (8)–(10), а также из других критериев, оценивающих точностные показатели следящей системы в контурном режиме ее работы [5].

Пример МК-оптимизации цифрового квазиоптимального по быстродействию регулятора. На рис. 2 представлена схема Simulink-модели контура положения следя-

щей системы с линейным объектом управления третьего порядка

$$W(s) = \frac{K}{(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)s},$$

в котором внутренний контур скорости представлен колебательным звеном с параметрами $K = 1,0 \text{ с}^{-1}$; $T = 0,05 \text{ с}$. Структура цифрового регулятора положения (рис. 3) соответствует алгоритму (7) с квадратичной линией переключения (4). Внешнее возмущение имитируется резким снижением скорости при ступенчатом возмущении $f(t)$ при приеме внешней нагрузки.

Для оптимизации регулятора положения было проведено прямое зондирование его динамики на случайной сетке в пространстве трех параметров (β_1, β_2, K_0) с оцениванием критериев (8)–(10) в соответствующих переходных процессах. На рис. 4 представлены выделенные три варианта результатов зондирования, для которых параметры регулятора имеют следующие значения:

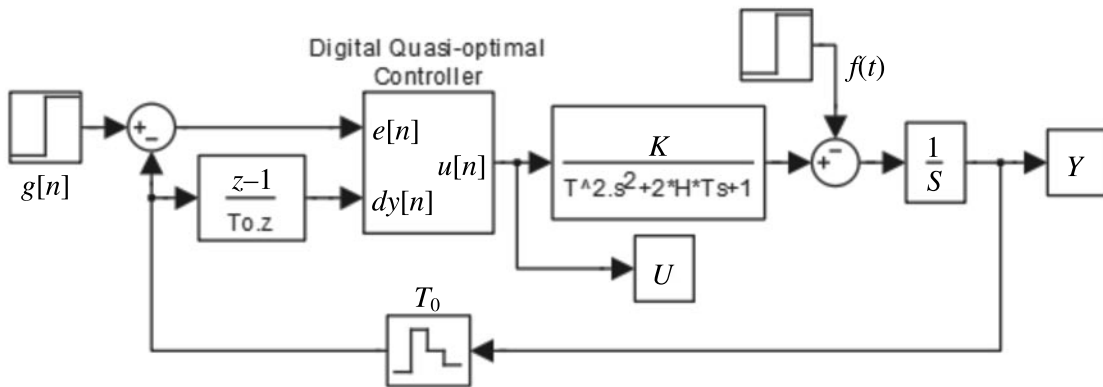


Рис. 2. Модель контура положения квазиоптимальной цифровой следящей системы

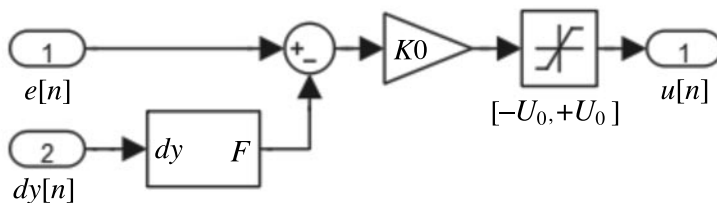


Рис. 3. Макроблок регулятора

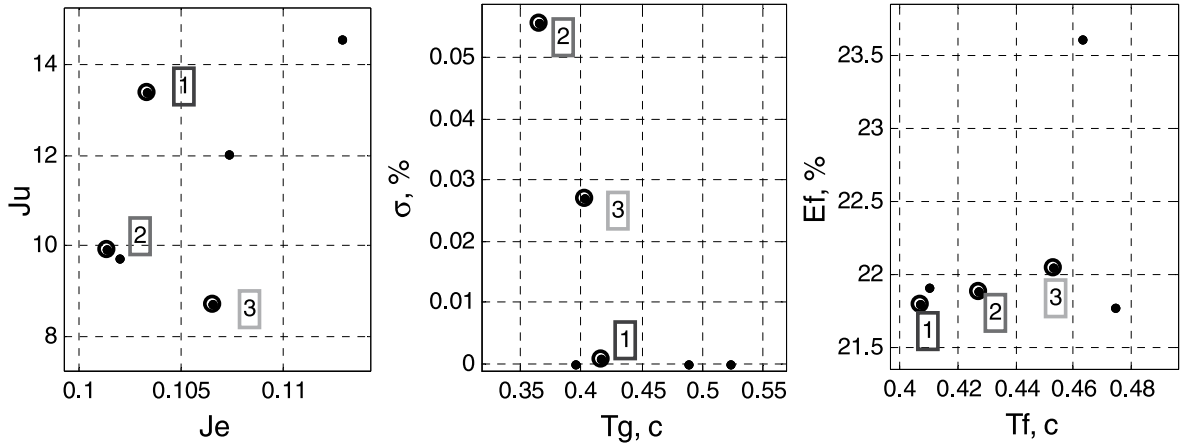


Рис. 4. Результаты зондирования

- (1) $\beta_1 = 0,0800$; $\beta_2 = 0,0017$; $K_0 = 54,4534$
- (2) $\beta_1 = 0,0619$; $\beta_2 = 0,0030$; $K_0 = 28,5422$
- (3) $\beta_1 = 0,0534$; $\beta_2 = 0,0088$; $K_0 = 24,7685$

На рис. 5 приведены кривые соответствующих квазиоптимальных переходных процессов и фазовых портретов.

Выбранные варианты значений параметров регулятора положения являются Парето-оптимальными: 2 и 3 – по критерию F_1 ; 1 – по критериям F_2 и F_3 . На-

стройка по первому варианту обеспечивает достижение максимального быстродействия при отсутствии перерегулирования в переходном процессе по входному воздействию. Однако по критерию J_u , оценивающему энергозатраты на управление, такая настройка не является Парето-оптимальной.

Заметим также, что статическая ошибка, возникающая в переходном процессе при внешнем возмущающем воздействии, в реальных следящих системах будет устраняться ПИ-регулятором внутреннего кон-

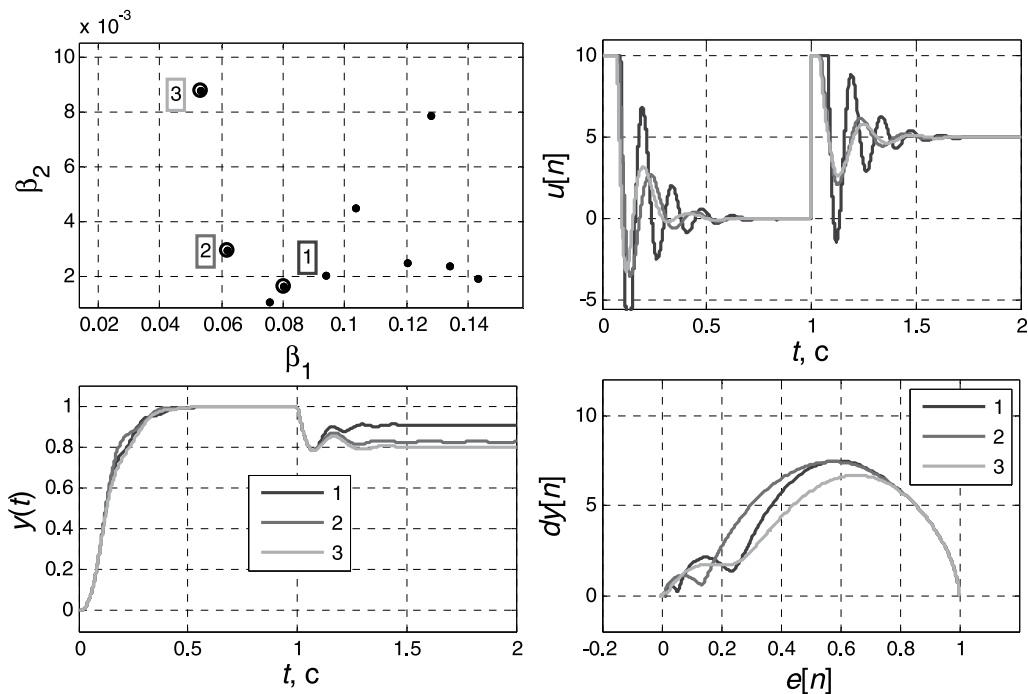


Рис. 5. Варианты настройки регулятора



тура скорости, обеспечивающим в системе астатизм второго порядка.

По изложенной выше методике можно сделать следующее заключение.

Определение на завершающем этапе синтеза квазиоптимальных по быстродействию цифровых регуляторов Парето-оптимальных значений их параметров по критериям (8)–(10) является практически важной задачей, т. к. они потенциально обеспечивают наилучшие показатели в позиционном режиме работы следящих систем.

Векторная оптимизация, в отличие от скалярной оптимизации по эталонным моделям или по интегральному критерию с субъективно задаваемыми весовыми коэффициентами, позволяет принимать по результатам зондирования объективные компромиссные и технически рациональные решения по настройке параметров регуляторов.

Предложенная методика имеет общий характер, поскольку она может применяться при МК-настройке параметров цифровых нелинейных квазиоптимальных регуляторов и с более сложными структурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления // Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб. в 3 т. Т. 2. Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
2. **Иванов В.А., Фалдин Н.В.** Теория оптимальных систем автоматического управления. М.: Наука, 1981.
3. **Клюев А.С., Колесников А.А.** Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. М.: Энергоиздат, 1982.
4. **Ловчаков Е.В., Соловьев А.Э.** Метод синтеза квазиоптимальных систем управления по критериям быстродействия и энергосбережения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 5. С. 220–230.
5. **Ростов Н.В.** Последовательная многокритериальная оптимизация регуляторов нелинейных систем автоматического управления

// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 6(113). С. 44–50.

6. **Ростов Н.В.** Многокритериальная параметрическая оптимизация цифровых регуляторов с учетом нелинейностей и действия внешних возмущений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 2(193). С. 91–98.

7. **Фалдин Н.В., Феофилов С.В.** Прикладные методы синтеза оптимальных по точности и быстродействию релейных следящих приводов // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2011. № 10. С. 38–44.

8. **Donald E. Kirk.** Optimal Control Theory: An Introduction. Prentice-Hall Inc., 1970.

9. **Kuo B.C.** Digital Control Systems. 2nd ed. Saunders College Publishing, 1992.

REFERENCES

1. Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya, *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. T.2. Pod red. N.D. Yegupova. Moscow: MGTU imeni N.E. Bauman Publ., 2000. (rus)
2. **Ivanov V.A., Faldin N.V.** *Teoriya optimalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Nauka Publ., 1981. (rus)
3. **Klyuyev A.S., Kolesnikov A.A.** *Optimizatsiya avtomaticheskikh sistem upravleniya po bystrodeystviyu*. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. (rus)
4. **Lovchakov E.V., Solovjev A.E.** Metod sinteza kvaziopimalnykh sistem upravleniya po kriteriyam bystrodeystviya i energosberezeniya, *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*, 2011, No. 5, Pp. 220–230. (rus)

5. **Rostov N.V.** Posledovatel'naya mnogokriterial'naya optimizatsiya regulyatorov nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010, No. 6(113), Pp. 44–50. (rus)

6. **Rostov N.V.** Mnogokriterial'naya parametricheskaya optimizatsiya tsifrovyykh regulyatorov s uchetom nelineynostey i deystviya vneshnikh vozmushcheniy, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 2(193), Pp. 91–98. (rus)

7. **Faldin N.V., Feofilov S.V.** Ppikladnyie metodyi sinteza optimalnykh po tochnosti i byistpodeystviyu peleynykh sledyaschih ppivodov, *Mehatronika*.

- Avtomatizatsiya. Upravlenie*, 2011, No. 10, Pp. 38–44. (rus)
8. **Donald E. Kirk.** *Optimal Control Theory: An Introduction*, Prentice-Hall Inc., 1970.
9. **Kuo B.C.** *Digital Control Systems*, 2nd ed., Saunders College Publishing, 1992.
-

РОСТОВ Николай Васильевич — доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

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

E-mail: rostovnv@mail.ru

ROSTOV, Nicolay V. *St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: rostovnv@mail.ru



УДК 62.50 + 517.11 + 519.92

*М.А. Марценюк, И.П. Селетков***ПРИВЕДЕНИЕ КОНЕЧНОГО НЕЧЕТКОГО АВТОМАТА
К НЕЧЕТКОЙ КОМБИНАЦИОННОЙ СХЕМЕ С БЛОКОМ ПАМЯТИ***М.А. Martsenyuk, I.P. Seletkov***CONVESION OF FUZZY FINITE AUTOMATA
TO FUZZY COMBINATIONAL CIRCUIT**

Рассмотрены модели логического автомата и комбинационной схемы, построенные с использованием нечеткой логики. Показано, что нечеткий автомат и нечеткая комбинационная схема обладают большей гибкостью в настройках, позволяя проще описать предметную область, чем их «четкие» аналоги. Также на конкретном примере проведено сравнение нечеткого автомата и комбинационной схемы, решающих одну и ту же задачу. Показано, что при прочих равных условиях нечеткая комбинационная схема обладает на порядок большим быстродействием, чем нечеткий автомат.

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА; НЕЧЕТКИЙ АВТОМАТ; НЕЧЕТКАЯ КОМБИНАЦИОННАЯ СХЕМА; АЛГОРИТМ МАМДАНИ.

In this paper finite logical automata and combinational circuit models using fuzzy logic are considered. It is shown that fuzzy finite automata and fuzzy combinational circuit simplify the programming of material area and are more flexible than their traditional non-fuzzy analogs. The comparison of automata and circuit implemented with the help of a specific example demonstrates that a fuzzy circuit generates the same output much faster than fuzzy automata.

FUZZY LOGIC; FUZZY AUTOMATA; FUZZY COMBINATIONAL CIRCUIT; MAMDANI'S ALGHORITM.

Введенное Заде в 1965 г. [1] понятие «нечеткого множества» позволило построить аппарат нечеткой логики и использовать его для тех приложений, где знания человека-эксперта плохо формализуются [2, 3]. В дальнейшем получили распространение «нечеткие автоматы с памятью» [4–7]. В настоящее время теория нечетких автоматов активно развивается, для них построено несколько видов моделей, отличающихся от традиционных (четких) автоматов наличием нечетких состояний и нечетких переходов между состояниями [8–11]. Однако при конкретной реализации таких автоматов встречаются некоторые трудности, препятствующие их широкому распространению. Дело в том, что «память» автомата задается неявно с помощью введения «состояний» автомата и переходов между ними. Поэтому при решении задач

трудно сделать оптимальный выбор числа состояний, как это обсуждается в работах [12–19] (для четких автоматов) и [8–11] (для нечетких автоматов). Другими словами, обращение к концепции состояний усложняет анализ предметной области и процедуру расчета выходного сигнала на каждом шаге работы автомата. Автоматы без памяти (комбинационные схемы) хотя и не имеют указанного недостатка, но без необходимой доработки не могут решить всего класса прикладных задач.

Цель данной работы состоит в том, чтобы определить условия реализации нечеткого автомата с помощью *модифицированной нечеткой комбинационной схемы* (МНКС), которая анализирует содержимое *внешнего блока памяти* (ВБП). Оказывается, что таким путем можно сохранить функциональность *нечеткого автомата с конечной*

памятью (НАКП) без обращения к понятию «состояния». МНКС, соответствующая автомату, в каждый момент времени t анализирует содержимое ВБП, хранящего несколько последовательных значений входных параметров $x(t)$, взятых в моменты времени $t - k\Delta t$, где k принимает значения $k = 0, 1, \dots, p$. Такой подход оказывается эффективным при решении многих конкретных задач. Проблема выбора числа состояний сводится к выбору объема (или «глубины») памяти ВБП, равного $p + 1$. Также облегчается и подбор функций истинности, соответствующих знаниям экспертов предметной области, что позволяет более эффективно добиться соответствия нечеткой модели и описываемой с ее помощью предметной области. Кроме того, для МНКС проще формулируются нечеткие правила вывода, т. к. в этом случае возникает возможность использовать известные алгоритмы нечеткого управления, предложенные Мамдани [20], Такаги-Сугено [21], в наших работах [22, 23] и др.

В настоящей статье кратко описывается схема работы четкого автомата. Показано, что переход обычного «четкого» автомата к «четкой» модифицированной комбинационной схеме возможен только для автомата с конечной памятью (АКП). Понятие об АКП введено в работе Брауэра [12]. Значение выходной переменной $y(t)$ АКП в текущий момент времени t может быть выражено в виде функции от значений входных сигналов за конечный промежуток времени. Показано, что и нечеткий автомат с конечной памятью может быть сведен к соответствующей модифицированной нечеткой комбинационной схеме.

Дается более удобная, чем обычно [4–11], формализация описания работы нечеткого автомата, работы нечеткой комбинационной схемы. С самого начала вводятся лингвистические переменные, которыми описываются входные и выходные переменные, а также состояния автомата, определяются «универсумы» (универсальные множества), на которых определены нечеткие множества, описывающие значения лингвистических переменных. Автоматные функции задаются на языке ве-

денных лингвистических переменных, что позволяет формализовать процесс перехода от НАКП к МНКС и процесс нечеткого вывода выходных параметров.

Описывается методика преобразования нечеткого автомата с конечной памятью к модифицированной комбинационной схеме, анализирующей текущее содержание внешнего блока памяти. На конкретном примере нечеткого автомата, обеспечивающего регулирование температуры некоторого объекта, демонстрируются преимущества предлагаемого подхода.

Представление «четкого» автомата в виде модифицированной комбинационной схемы

Как известно, логические («четкие») автоматы с памятью (см., например, [12, 13]) описываются кортежем $\{x, y, s, F, G\}$, где x – набор векторов входных переменных, y – набор векторов выходных сигналов, s – набор состояний автомата, F и G – функция переходов и функция выходов соответственно: $s_{t+\Delta t} = F(s_t, x_t)$, $y_t = G(s_t, x_t)$. Для конечных автоматов каждый из наборов векторов x и y , а также набор состояний s являются конечными.

В конкретных приложениях используются также автоматы с конечной памятью АКП (рис. 1 а), понятие о которых было введено в [12]. Работа таких автоматов оказывается эквивалентной отображению вида

$$y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t, y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}), \quad (1)$$

где $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$ – значения векторов входной переменной; $y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}$ – значения векторов выходной переменной; p и q – конечные положительные целые числа, $q < p$.

Легко видеть, что отображение (1) для конечного автомата может быть реализовано с помощью комбинационной схемы (КС), анализирующей ВБП. В текущий момент времени t в ВБП хранится совокупность аргументов отображения (1) $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t, y_{t-q\Delta t}, \dots, y_{t-2\Delta t}, y_{t-\Delta t}$, а роль комбинационной схемы состоит в том, чтобы в зависимости от содержания ВБП определить значение выходной пере-

менной y_t в соответствии с (1). Далее мы ограничиваемся более простым, но практически важным случаем, когда отображение (1) имеет вид

$$y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t). \quad (2)$$

Это значит, что для работы КС в блоке памяти достаточно сохранять значения

только входных переменных в текущий момент времени t и в предшествующие моменты времени $t - \Delta t > \dots > t - p\Delta t$. Далее, параметр p будем называть «глубиной» памяти входных переменных. Применение развиваемого подхода для более общего случая, соответствующего зависимости (1), не представляет особых затруднений.

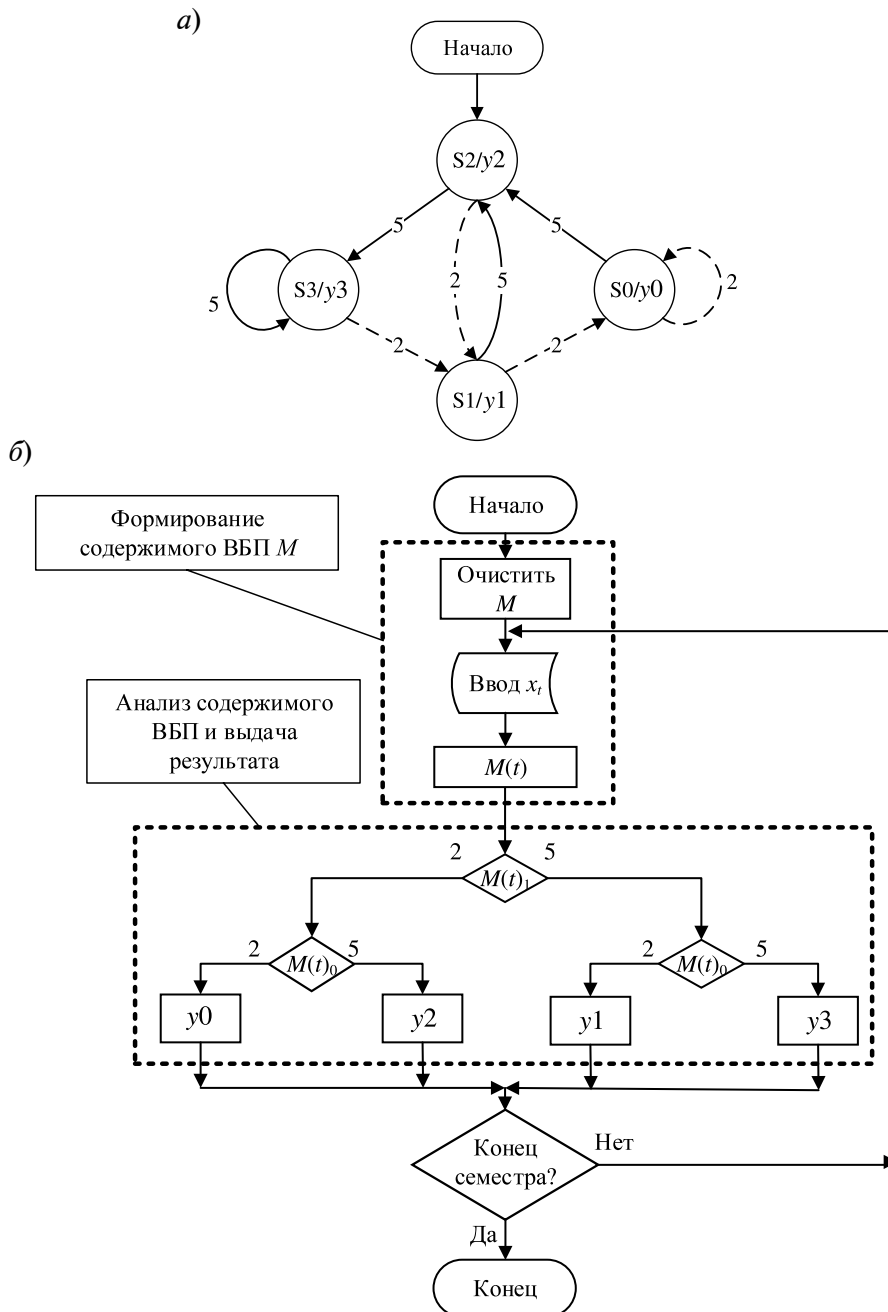


Рис. 1. Алгоритм работы автомата «умный отец» (а) и соответствующей комбинационной схемы, анализирующей внешний блок памяти (б)

Таким образом, предполагается, что содержанием M ВБП (рис. 1 б) является последовательность из $p + 1$ входных переменных $M(t) = \{x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t\}$. Содержание памяти M обновляется на каждом шаге по типу FIFO (first input, first output). Комбинационная схема анализирует набор значений входных переменных $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$, которые находятся в данный момент в ВБП. Каждому набору $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$ сопоставляется определенное значение выходной переменной y_t .

Для иллюстрации рассмотрим в упрощенном виде автомат «умный отец» (рис. 1 а), предложенный в книге Ю.Г. Карпова [13]. В зависимости от оценок сына x , принимающих значения 2 или 5, автомат выбирает одну из возможных реакций отца: y_0 – ругать сына, y_1 – успокаивать сына, y_2 – надеяться, y_3 – радоваться. Представление этого автомата в виде комбинационной схемы, анализирующей внешний БП, получено в работе [14] (рис. 1 б).

Для простоты в данной статье рассматривается автомат Мура. Число реакций отца сокращено с 6 до 4. Представление полного автомата «умный отец» в виде комбинационной схемы приведено в [14].

Таблица 1

Таблица переходов между состояниями и выходных сигналов «четкого» автомата «умный отец»

x	S			
	S_0	S_1	S_2	S_3
2	S_0	S_0	S_1	S_1
5	S_2	S_2	S_3	S_3
y	y_0	y_1	y_2	y_3

Таблица 2

Зависимость реакции автомата «умный отец» от последовательности входных сигналов x_{k-1}, x_k

x_{k-1}, x_k	Реакция отца
2, 2	y_0
5, 2	y_1
2, 5	y_2
5, 5	y_3

Автомат «умный отец» можно также задать с помощью таблицы переходов между состояниями и выходных сигналов (табл. 1).

Как можно убедиться путем непосредственной проверки, этот автомат имеет конечную память. Действительно, оказывается, что в каком бы из состояний S_0, S_1, S_2, S_3 ни находился автомат в момент времени $t - \Delta t$, при заданной последовательности из двух входных переменных $x_{t-\Delta t}, x_t$ автомат выдает одно и то же значение выходной переменной y_t . То есть в данном случае реализуется отображение $y_t = h(x_{t-\Delta t}, x_t)$, показанное в табл. 2. Отсюда следует, что он может быть реализован в виде комбинационной схемы и внешнего блока памяти (рис. 1 б), который хранит две последние оценки $M(t) = \{x_{t-\Delta t}, x_t\}$. Схема «анализирует» содержимое ячеек блока памяти $M_0(t) = x_{t-\Delta t}, M_1(t) = x_t$.

Нечеткий автомат

Модель нечеткого автомата используется в следующих случаях: когда предметная область описывается экспертом лингвистическими (словесными) правилами; трудно разработать достаточно простую математическую модель предметной области; необходима высокая гибкость в настройках системы управления; требуется расширить область значений входных параметров «четкого» автомата без введения дополнительных состояний и др.

Будем исходить из того, что в основе модели нечеткого автомата НАКП лежит некоторый четкий автомат с конечной памятью (АКП). Для описания этого АКП вводятся переменные x, y, s (см. обозначения, введенные в предыдущем разделе), принимающие значения на конечных множествах A, B, C ($x \in A, y \in B, s \in C$). Для АКП также считаются известными автоматные функции $s_{t+\Delta t} = F(s_t, x_t), y_t = G(s_t, x_t)$, которые могут быть заданы табличным способом. Далее, при переходе к модели нечеткого автомата, множества A, B, C мы будем считать «универсальными» множествами, на которых будут задаваться нечеткие подмножества, описывающие лингвистические переменные.

Для описания НАКП введем «лингвистические» переменные: α, β, γ , где α, β – входная и выходная переменные, а γ – переменная состояния. Каждая из величин α, β и γ принимает значения из наборов $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_u\}, \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_v\}, \{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_w\}$ соответственно. Величины $\alpha_i, i \in [0, u], \beta_j, j \in [0, v], \gamma_k, k \in [0, w]$ количественно описываются нечеткими подмножествами введенных выше универсумов A, B, C соответственно с помощью функций принадлежности $\mu_{\alpha_i}(x), \mu_{\beta_j}(y)$ или $\mu_{\gamma_k}(s)$. Далее мы будем отождествлять лингвистические переменные и описывающие их нечеткие множества.

Алгоритм работы нечеткого автомата формулируется на языке лингвистических переменных. Переходы между состояниями автомата и значение выходного сигнала выражаются нечеткими автоматными функциями:

$$\gamma_{t+\Delta t} = \Gamma(\alpha_t, \gamma_t), \beta_t = B(\alpha_t, \gamma_t). \quad (3)$$

Как и в случае четкого конечного автомата, функции Γ и B могут быть заданы табличным методом (см., например, табл. 3). Эти таблицы совпадают с аналогичными таблицами автоматных функций четкого автомата, но с тем отличием, что как в заголовки таблиц, так и в их ячейки должны быть подставлены соответствующие лингвистические переменные. Автоматные функции НАКП могут быть заданы и с помощью более кратких индексных обозначений:

$$\sum_{all\ i, n} \varepsilon_{i, n, m} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \gamma_m; \quad (4)$$

$$\sum_{all\ i, n} \delta_{i, n, j} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \beta_j,$$

где введены матрицы переходов $\varepsilon_{i, n, m}$ и выходов $\delta_{i, n, j}$ автомата, компоненты которых принимают значения, равные нулю или единице, в соответствии с заданными конкретными правилами «если ..., то...». В таком же виде могут быть выражены автоматные функции и АКП. Логические связи \wedge, \rightarrow между нечеткими множествами могут быть реализованы по известным правилам, введенным Заде. В случае автомата Мура выходной сигнал определяется толь-

ко текущим состоянием автомата и правила (4) сводятся к следующему виду:

$$\sum_{all\ i, n} \varepsilon_{i, n, m} \alpha_i \wedge \gamma_n \rightarrow \gamma_m; \sum_{all\ n, j} \delta_{n, j} \gamma_n \rightarrow \beta_j. \quad (5)$$

Отметим, что состояния нечеткого автомата описываются с помощью лингвистической переменной γ . Значения этой переменной задаются нечеткими подмножествами универсального множества состояний C , включающего все состояния АКП, и описываются функциями принадлежности $\mu_{\gamma_k}(s)$. Поэтому можно сказать, что у НАКП с разной степенью активны сразу несколько состояний соответствующего ему АКП, причем степень активности определяется функцией $\mu_{\gamma_k}(s)$.

Для численной реализации работы НАКП будем считать, что в текущий момент времени t известны параметры x_t, s_t . Практически входные и выходные параметры нечеткого автомата (как и у четкого), задаются некоторыми «четкими» числами. Например, на входе автомата – это показания датчиков, а на выходе – уровень сигнала управления [4–6]. Отличие нечеткого автомата от «четкого» заключается в использовании другого алгоритма преобразования входного сигнала в выходной.

Вычислительная процедура строится следующим образом. Для заданных значений x_t, s_t с помощью функций $\mu_{\alpha_i}(x_t), \mu_{\gamma_k}(s_t)$ определяем их степени принадлежности нечетким множествам α_i, γ_j , которые представляют собой некоторые наборы чисел, лежащих на отрезке $[0, 1]$. Для вычисления величин $y_{t+\Delta t}, s_{t+\Delta t}$ воспользуемся известным алгоритмом Мамдани [20] и правилами Заде оперирования над нечеткими множествами [1]. Здесь могут быть также применены алгоритмы и других авторов [2, 3, 21–23]. Как и в работе [23], введем вспомогательные функции $Q(s), R(y)$, позволяющие кратко представить алгоритм Мамдани:

$$Q(s) = \bigvee_{i, n, m} \varepsilon_{i, n, m} \min(\mu_{\alpha_i}(x_t), \mu_{\gamma_n}(s_t), \mu_{\gamma_m}(s));$$

$$R(y) = \bigvee_{i, n, j} \delta_{i, n, j} \min(\mu_{\alpha_i}(x_t), \mu_{\gamma_n}(s_t), \mu_{\beta_j}(y)). \quad (6)$$

С помощью этих функций найдем средние значения

$$\bar{s} = \frac{\int_{all S} s Q(s) ds}{\int_{all S} Q(s) ds}; \bar{y} = \frac{\int_{all y} y R(y) dy}{\int_{all y} R(y) dy}, \quad (7)$$

которые (после округления до целого числа) мы отождествим со значениями параметров s, y в момент времени $t + \Delta t$:

$$s_{t+\Delta t} = round(\bar{s}); y_{t+\Delta t} = round(\bar{y}). \quad (8)$$

На этом завершается обработка значения входного сигнала, и автомат ожидает поступление на вход следующего сигнала.

Модифицированная нечеткая комбинационная схема

Прежде чем перейти к решению основной задачи данной работы – построению МНКС, соответствующей заданному НАКП, в этом разделе рассмотрим принцип работы МНКС.

Алгоритм работы МНКС определяется набором правил, сформулированных экспертом на языке лингвистических переменных α и β , соответствующих входным и выходным параметрам (введение лингвистической переменной состояний здесь не требуется). Они имеют значения $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_u, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_v$, которые количественно описываются функциями $\mu_{\alpha_i}(x)$ и $\mu_{\beta_j}(y)$, (пример функций см. на рис. 4). Входные и выходные параметры принимают значения на универсальных множествах A, B , так что $x \in A, y \in B$. В момент времени t на вход комбинационной схемы подается последовательность значений входного параметра $\alpha_{t-p\Delta t}, \dots, \alpha_{t-\Delta t}, \alpha_t$ за некоторый промежуток времени $(p+1)\Delta t$. Значение выходного сигнала задается некоторой функцией $\beta_t = H(\alpha_{t-p\Delta t}, \dots, \alpha_{t-\Delta t}, \alpha_t)$. Эта функция может быть задана как таблица (см., например, табл. 7). Для дальнейшего использования перепишем ее в виде индексной записи:

$$\beta_j = H(\alpha_{ip}, \dots, \alpha_{i1}, \alpha_{i0}). \quad (9)$$

Функциональная зависимость H задается правилами вида «Если ..., то ...» и в терминах логических операций над нечеткими множествами может быть сформулирована в индексной записи следующим образом:

$$\sum_{all ip, \dots, i1, i0} \delta_{ip, \dots, i1, i0, j} \alpha_{ip} \wedge \dots \dots \wedge \alpha_{i1} \wedge \alpha_{i0} \rightarrow \beta_j. \quad (10)$$

Значения компонент матрицы выходного сигнала $\delta_{ip, \dots, i1, i0, j}$ определяются заданными правилами «Если ..., то ...».

Количественная реализация МНКС сводится к нахождению параметра y_t по заданной последовательности значений входного параметра $x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t$. По этим величинам входного параметра находим значения функций принадлежности для всех значений входной лингвистической переменной α $\mu_{\alpha_{ip}}(x_{t-p\Delta t}), \dots, \mu_{\alpha_{i0}}(x_{t-\Delta t}), \mu_{\alpha_{i0}}(x_t)$, которые являются некоторыми числами из отрезка $[0, 1]$. Для вычисления y_t в соответствии с алгоритмом Мамдани [20] строим вспомогательную функцию $V(y)$, имеющую следующий вид:

$$V(y) = \bigvee_{ip, \dots, i0, j} \delta_{ip, \dots, i0, j} \min(\mu_{\alpha_{ip}}(x_{t-p\Delta t}) \wedge \dots \dots \wedge \mu_{\alpha_{i0}}(x_t) \wedge \mu_{\beta_j}(y)). \quad (11)$$

С помощью этой функции найдем среднее значение

$$\bar{y} = \frac{\int_{all y} y V(y) dy}{\int_{all y} V(y) dy}, \quad (12)$$

которое (после округления до целого числа) мы отождествим со значениями параметра y в момент времени t :

$$y_t = round(\bar{y}). \quad (13)$$

На этом завершается обработка очередного значения входного сигнала, и МНКС ожидает поступление на вход следующего сигнала.

Построение МНКС по заданному НАКП

Для любого нечеткого автомата с конечной памятью можно построить эквивалентную нечеткую комбинационную схему, анализирующую содержимое внешнего блока памяти. Выходной сигнал МНКС, вообще говоря, не будет в точности совпадать с сигналом НАКП, но будет соответствовать ему с высокой точностью. Отметим, что для связи АКП и МКС выполняется полное со-

ответствие выходных сигналов.

Для построения МНКС необходимо найти функцию $\beta_j = H(\alpha_{ip}, \dots, \alpha_{i1}, \alpha_{i0})$ по заданным автоматным функции НАКП. Эта задача может быть решена следующим образом. Будем считать, что нам известна функция $y_t = h(x_{t-p\Delta t}, \dots, x_{t-\Delta t}, x_t)$, которая задает МКС для четкого автомата АКП, на основе которого построен НАКП. Поскольку таблицы переходов четкого и нечеткого автоматов совпадают, то будут совпадать и функции выходов соответствующих им комбинационных схем. Более конкретно это можно выразить следующим образом. Записывая функцию (9) в табличном виде (10), мы можем утверждать, что эта таблица в точности совпадает с соответствующей таблицей для четкой комбинационной схемы.

Решение задачи терморегулирования

Эффективность использования введенных понятий НАКП и МНКС и их сравнение между собой покажем на примере задачи управления температурным режимом в производственной установке, в которой необходимо поддержание постоянной температуры $T = T_0$ (т. н. «температура уставки»). В системе наблюдается отток тепла во внешнюю среду $Q = -k_Q(T - \tilde{T})$. Возможны случайные колебания температуры, вызванные внешними факторами $P(t)$. Требуется рассчитать мощности нагревателя $wh(t)$ и охладителя $wc(t)$, позволяющие в случае внешних случайных воздействий вернуть температуру объекта к значению уставки. Также при формировании выходного сигнала wc , wh требуется проанализировать историю изменения входной температуры T , чтобы минимизировать время отклика и перерегулирование (т. н. «заброс»).

Общее уравнение теплового баланса выглядит следующим образом:

$$C \frac{dT}{dt} = -k_Q(T - \tilde{T}) + P(t) + k_h \cdot wh(t) - k_c \cdot wc(t), \quad (16)$$

где k_h – коэффициент теплоотдачи нагревателя; k_c – коэффициент теплопоглощения охладителя; \tilde{T} – температура окружающей среды.

Ввиду того что в уравнении в общем виде есть нелинейный компонент $P(t)$, его решение численными методами потребует большого количества времени. С другой стороны, эта же система может быть легко описана с помощью лингвистических правил:

«если температура среды «слишком низкая», то нужно подать «высокую» мощность на нагреватель и «низкую» на охладитель»;

«если температура среды «слишком высокая», то нужно подать «низкую» мощность на нагреватель и «высокую» на охладитель»;

«если температура среды «близка к уставочному значению», то нужно подать «низкую» мощность на нагреватель и «низкую» на охладитель».

В связи с этим данную задачу предпочтительнее решать методами нечеткой логики.

Обозначим параметры, используемые при формировании управляющего воздействия следующим образом:

T – текущая температура среды в производственной установке, $T \in [T_{\min}, T_{\max}]^{\circ}\text{C}$;
 wc – мощность охладителя, $wc \in [0, wc_{\max}] \text{Вт}$;
 wh – мощность нагревателя, $wh \in [0, wh_{\max}] \text{Вт}$.

В дальнейшем параметр T играет роль входа, а параметры wc и wh – выходов системы.

Анализ правил позволяет выделить следующие значения лингвистических переменных:

α_0 = «температура среды низкая», α_1 = «температура среды близка к уставочному значению», α_2 = «температура среды высокая»;

βc_0 = «мощность охладителя низкая», βc_1 = «мощность охладителя высокая»;

βh_0 = «мощность нагревателя низкая», βh_1 = «мощность нагревателя высокая».

НАКП-терморегулятор. Построим четкий автомат Мура, который по определению [12, 13, 15] формирует управляющий сигнал в зависимости от своего текущего состояния. В рассматриваемой системе возможны три управляющих воздействия: нагрев, охлаждение, стационарный режим.

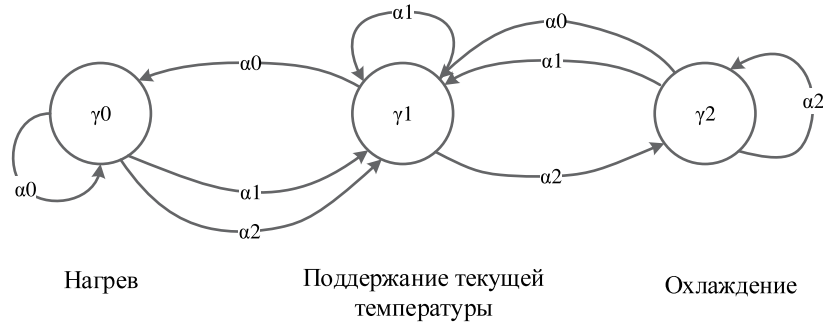


Рис. 2. Схема состояний и переходов нечеткого автомата Мура для управления температурой

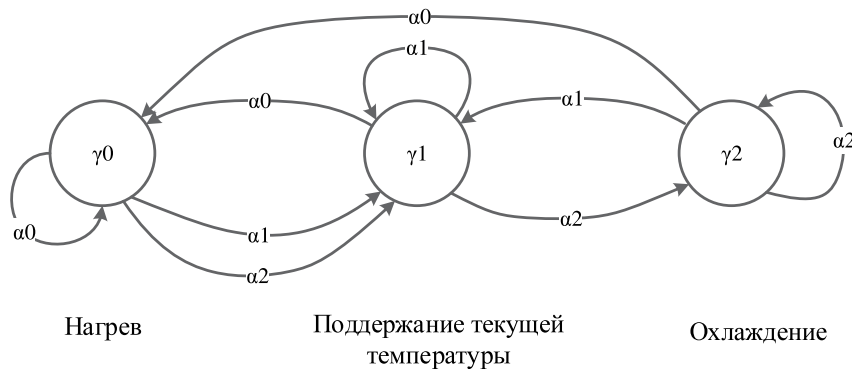


Рис. 3. Схема состояний и переходов нечеткого автомата Мура с конечной памятью для управления температурой

С учетом этого введем лингвистическую переменную γ для описания состояния автомата со значениями $\gamma_0 = \text{«нагрев»}$, $\gamma_1 = \text{«без изменений»}$, $\gamma_2 = \text{«охлаждение»}$.

Количественно она описывается множеством допустимых номеров состояний автомата $s \in S = [0, 2]$, на котором для каждого значения лингвистической переменной γ_k , $k \in \{0, 1, 2\}$ определены нечеткие подмножества, заданные функциями принадлежности, рис. 4 а.

Построим схему состояний автомата (рис. 2).

К сожалению, такой автомат обладает бесконечной памятью, т. к. сколь угодно длинная последовательность входных сигналов $\alpha_0 - \alpha_2 - (\alpha_0 - \alpha_2)$ может перевести автомат в любое из его состояний. Внесем корректировку в схему состояний с учетом наличия постоянного оттока тепла из системы (рис. 3).

На языке введенных лингвистических переменных исходные правила формулируются следующим образом:

«Если в момент времени t состояние автомата $\gamma = \gamma_1$ («поддержание») и температура среды $\alpha = \alpha_1$ («близка к уставочному значению»), то в момент времени $t + \Delta t$ состояние автомата будет $\gamma' = \gamma_1$ (поддержание»), температура охладителя $\beta c = \beta c_0$ («низкая»), температура нагревателя $\beta h = \beta h_0$ («низкая»).

Все правила для описания переходов и выходов в автомате удобнее сформулировать в виде таблицы (табл. 3).

По табл. 3 сформируем матрицы переходов и выходов (табл. 4–6).

Количественное описание всех лингвистических переменных (при $T_0 = 200$ °С) зададим функциями истинности $\mu_{\alpha_i}(T)$, $\mu_{\beta c_j}(wc)$, $\mu_{\beta h_j}(wh)$ и $\mu_{\gamma_m}(s)$, изображенными на рис. 4.

Таблица 3

Таблица переходов и выходов нечеткого автомата «терморегулирование» на языке лингвистических переменных

α	γ		
	γ_0	γ_1	γ_2
α_0	γ'_0	γ'_0	γ'_0
α_1	γ'_1	γ'_1	γ'_1
α_2	γ'_1	γ'_2	γ'_2
βc	βc_0	βc_0	βc_1
βh	βh_1	βh_0	βh_0

Таблица 4

Матрица переходов $\varepsilon_{i,n,m}$ нечеткого автомата «терморегулирование»

i, n	m		
	0	1	2
0, 0	1	0	0
0, 1	1	0	0
0, 2	1	0	0
1, 0	0	1	0
1, 1	0	1	0
1, 2	0	1	0
2, 0	0	1	0
2, 1	0	0	1
2, 2	0	0	1

Таблица 5

Матрица выходного сигнала для охладителя $\delta c_{n,j}$ нечеткого автомата «терморегулирование»

j	n		
	0	1	2
0	1	1	0
1	0	0	1

Таблица 6

Матрица выходного сигнала для нагревателя $\delta h_{n,j}$ нечеткого автомата «терморегулирование»

j	n		
	0	1	2
0	0	1	1
1	1	0	0

Дальнейший расчет управляющего воздействия осуществляется по алгоритму, описанному выше.

МНКС-терморегулятор. Построим МНКС для управления температурным режимом в описанной выше установке на основе разработанного ранее НАКП.

Проанализируем последовательности значений входных параметров, которые обрабатывает автомат. Например, подстановкой в функцию $V(\alpha_0, \gamma_0)$ вместо состояния γ_0 различных функций переходов Γ в это состояние, получаем набор зависимостей выходного параметра от значений входных параметров на один шаг глубже (раньше) по времени:

$$\begin{aligned} \beta c_0 &= V(\alpha_0, \gamma_0) = V(\alpha_0, \Gamma(\alpha_0, \gamma_0)) = \\ &= V^{(1)}(\alpha_0, \alpha_0, \gamma_0); \\ \beta c_0 &= V(\alpha_0, \gamma_0) = V(\alpha_0, \Gamma(\alpha_0, \gamma_1)) = \\ &= V^{(1)}(\alpha_0, \alpha_0, \gamma_1); \\ \beta c_0 &= V(\alpha_0, \gamma_0) = V(\alpha_0, \Gamma(\alpha_0, \gamma_2)) = \\ &= V^{(1)}(\alpha_0, \alpha_0, \gamma_2). \end{aligned} \quad (17)$$

Из формул видно, что в каком бы состоянии γ_0, γ_1 или γ_2 не находился автомат в момент времени $t - \Delta t$, если последовательность значений температуры объекта характеризуется лингвистическими терминами α_0 и α_0 («низкая» и снова «низкая»), тогда необходимо на охладитель подать напряжение βc_0 («низкое»). Другими словами, данный результат зависит от входных параметров и не зависит от состояния:

$$\beta c_0 = \tilde{V}(\alpha_0, \alpha_0). \quad (18)$$

В итоге мы получаем одно из лингвистических правил, которое описывает работу нечеткой комбинационной схемы. Аналогично находятся остальные правила. Запишем их коротко в табл. 7.

Алгоритм выбора выходных сигналов МНКС также можно привести в виде блок-схемы (рис. 5).

По табл. 7 сформируем матрицы выходов (табл. 8, 9).

Сравнение результатов работы НАКП, МНКС и ПИД-регулятора. Сравним управляющие воздействия, полученные обоими

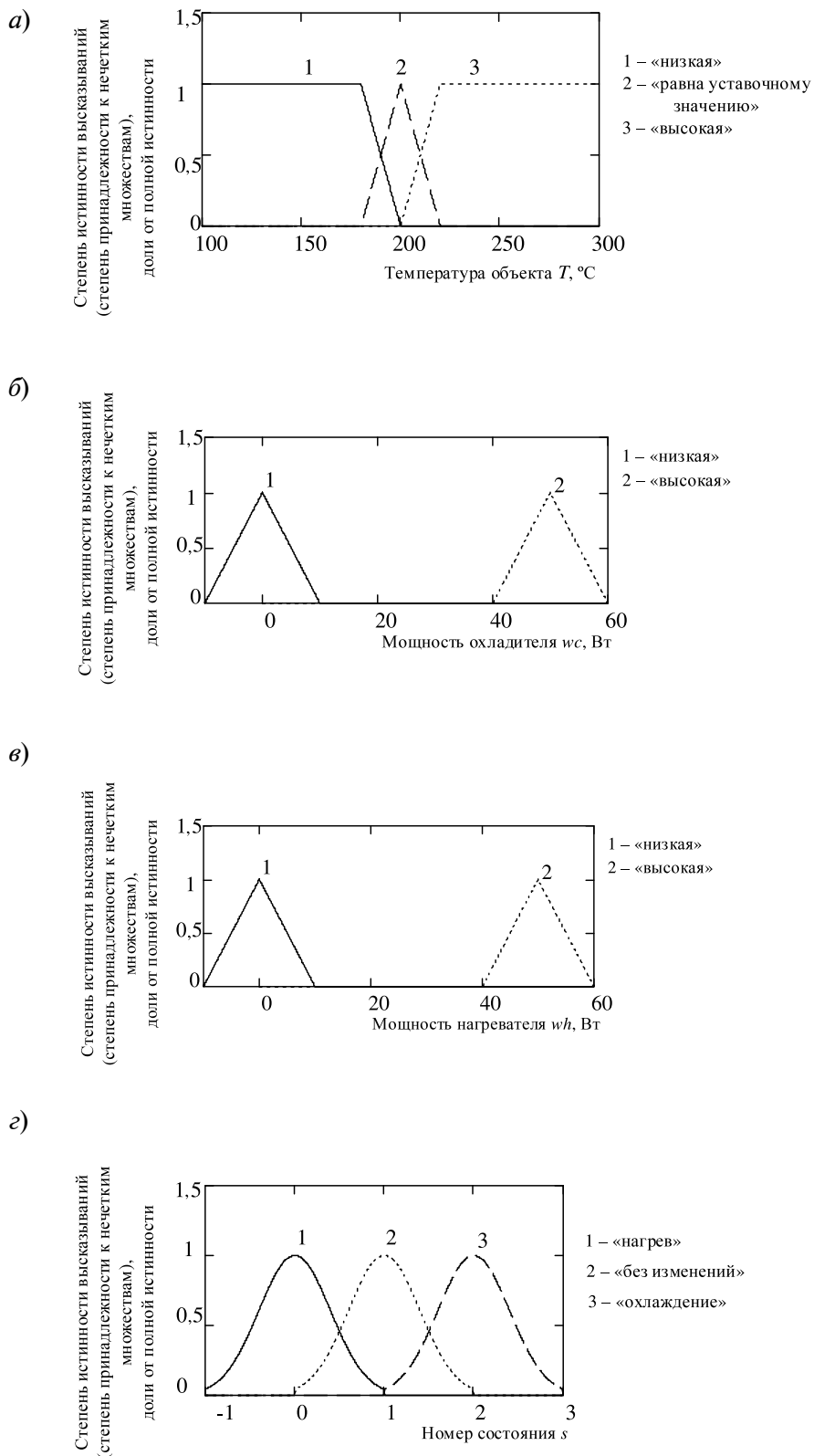


Рис. 4. Функции истинности термов лингвистических переменных:
 а – «температура среды»; б – «мощность охладителя»; в – «мощность нагревателя»;
 г – «состояние автомата»

Таблица 7

Зависимость выходных сигналов МНКС «терморегулирование» от входных

α_{i1}, α_{i0}	βc_i	βh_i
$-, \alpha_0$	βc_0	βh_1
$-, \alpha_1$	βc_0	βh_0
α_0, α_2	βc_0	βh_0
α_1, α_2	βc_1	βh_0
α_2, α_2	βc_1	βh_0

алгоритмами с помощью численной модели объекта в среде MathCAD. Расчет температуры в модели осуществляется по закону (16). Коэффициенты в модели имеют значения $k_q = 0,01$, $k_c = 0,3$, $k_h = 0,3$. Температура внешней среды $T = 20^\circ\text{C}$. Сформируем внешнее «случайное» воздействие на температуру объекта в момент времени $t = 2$. Такое воздействие в реальной производственной установке может быть связано с добавлением

в нее нового реагента, температура которого отличается от температуры уставки.

Рассчитаем изменение температуры под управлением НАКП, МНКС и, для демонстрации эффективности, ПИД-регулятора с коэффициентами $k_n = 2$, $k_{и} = 1,5$, $k_d = 1,3$ (рис. 6). Приведенные коэффициенты были подобраны эмпирически в ходе эксперимента так, чтобы минимизировать заброс и колебания.

Сравним быстродействие всех моделей. Для этого найдем суммарное время, потребовавшееся для расчета приведенных выше последовательностей температур (табл. 10).

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- МНКС формирует управляющий сигнал, аналогичный управляющему сигналу НАКП с высокой точностью;
- МНКС работает быстрее НАКП;
- нечеткие устройства по скорости формирования управляющего сигнала не уступают ПИД-регулятору;

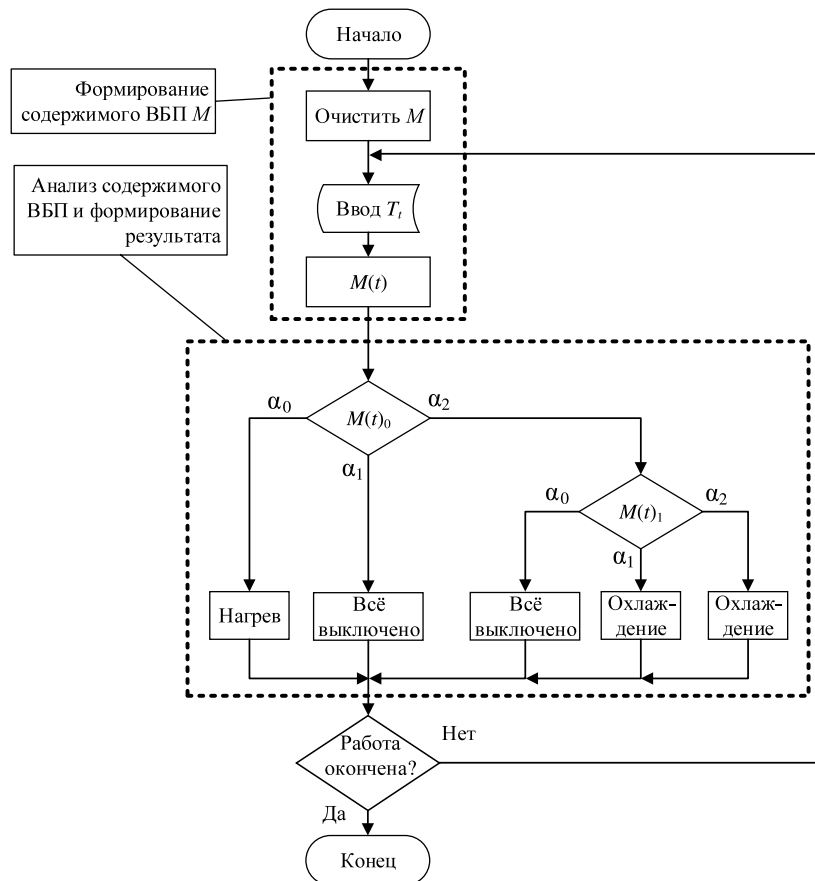


Рис. 5. Блок-схема алгоритма выбора управляющего воздействия в МНКС «терморегулирование»

Таблица 8

Матрица для расчета мощности охладителя
 $\delta c_{i_l, j_0, j}$ МНКС «терморегулирование»

i_l, j_0	j	
	0	1
0, 0	1	0
0, 1	1	0
0, 2	1	0
1, 0	1	0
1, 1	1	0
1, 2	0	1
2, 0	1	0
2, 1	1	0
2, 2	0	1

Таблица 9

Матрица для расчета мощности нагревателя
 $\delta h_{i_l, j_0, j}$ МНКС «терморегулирование»

i_l, j_0	j	
	0	1
0, 0	0	1
0, 1	1	0
0, 2	1	0
1, 0	0	1
1, 1	1	0
1, 2	1	0
2, 0	0	1
2, 1	1	0
2, 2	1	0

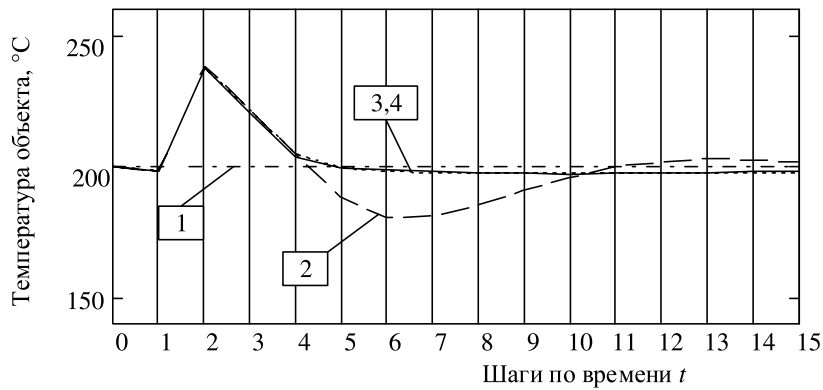


Рис. 6. Температура среды в производственной установке.

Компенсирование возмущений с помощью НАКП, МНКС, ПИД-регулятора:

- 1 – температура уставки $T = 200$ °C; 2 – температура объекта под управлением ПИД-регулятора;
- 3 – температура объекта под управлением НАКП; 4 – температура объекта под управлением МНКС

- нечеткие устройства обладают большей гибкостью в настройках, в связи с чем их намного легче настроить для достижения эффективного управления, чем ПИД-регулятор;

- в случае нечетких устройств не составляет труда добиться отсутствия эффекта перерегулирования.

Показано, что работу нечеткого автомата с конечной памятью можно описать с помощью модифицированной нечеткой комбинационной схемы. Результирующие сигналы автомата и схемы в обоих случаях совпадают между собой с высокой точностью. Нечеткие комбинационные схемы, так же как и нечеткие автоматы, обладают гибкостью

Таблица 10

Полные времена расчетов изменения температуры в установке под управлением различных устройств

Управляющее устройство	Время расчета, с
НАКП	0,047
МНКС	0,015
ПИД-регулятор	0,016

настройки и более широкой областью допустимых значений входных параметров по сравнению с «четкими» автоматами.

Однако нечеткие комбинационные схе-



мы обладают большей простотой реализации по сравнению с нечеткими автоматами, т. к. при их построении можно напрямую применять широко известные алгоритмы нечеткого логического вывода. Быстродействие МНКС оказывается выше, чем быстродействие НАКП.

Быстродействие нечетких устройств оказывается на уровне быстродействия ПИД-регулятора. Однако нечеткие устройства обладают большей простотой настройки по сравнению с ПИД-регулятором, что позволяет избавиться от эффекта перерегулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.
2. Mohammadian M., Sarker R.A., Yao X. *Computational intelligence in control*. Idea Group Publishing, 2003.
3. Перат А. Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. М.: Бином, 2009. 798 с.
4. Santos E. Maximin automata // *Information and Control*. 1968. Vol. 13. Pp. 363–377.
5. Topencharov V., Stoeva S. Fuzzy-topological automata // *Fuzzy Sets and Systems*. 1985. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 65–74.
6. Reyneri L.M. An Introduction to Fuzzy State Automata. *Biological and Artificial Computation: From Neuroscience to Technology // Lecture Notes in Computer Science*. 1997. Vol. 1240. Pp. 273–283.
7. Malik D.S., Mordeson J.N., Sen M.K. Minimization of fuzzy finite automata // *Information Sciences*. 1999. Vol. 113(3-4). Pp. 323–330.
8. Mordeson J.N., Malik D.S. *Fuzzy automata and languages: theory and applications*. Chapman & Hall/CRC, 2002.
9. Belohlavek R., Krupka M. Approximate minimization of fuzzy automata. Palacky University, 2007.
10. Bartolomiej P. A traffic model based on fuzzy cellular automata // *J. of Cellular Automata*, 2013. Vol. 8. No. 3-4. Pp. 261–282.
11. Micic I., Jancic Z., Ignjatovic J, Ciric M. Determinization of fuzzy automata by means of the degrees of language inclusion. [электронный ресурс] / URL: <http://arxiv.org/abs/1410.6063> (дата обращения 09.12.2014).
12. Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.
13. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. СПб.: Питер, 2003. 208 с.
14. Марценюк М.А. Операторно-логические

схемы как средство изучения алгоритмов в учебных курсах по математике и информатике // *Прикладная информатика*. 2010. № 5(23). С. 43–54.

15. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: ИД «Вильямс», 2002. С. 528.
16. Berstel J., Boasson L., Carton O., Fagnot I. Minimization of Automata, Automata: from Mathematics to Applications, European Mathematical Society [электронный ресурс] / URL: <http://arxiv.org/abs/1010.5318> (дата обращения 09.12.2014).
17. Campeanu C. Simplifying Nondeterministic Finite Cover Automata // *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*. 2014. Vol. 151. Pp. 162–173.
18. Anderson J.A. *Automata Theory with Modern Applications*. Cambridge University Press, 2006.
19. Lei H., Li Y.M. Minimization of states in automata theory based on finite lattice-ordered monoids // *Information Sciences*. 2007. Vol. 177(6). Pp. 1413–1421.
20. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // *In Proc. IEEE*. 1974. Pp. 121–159.
21. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modelling and control // *IEEE Trans. On SMC* 15. 1985. Pp. 116–132.
22. Марценюк М.А., Поляков В.Б., Селетков И.П. Матричная реализация алгоритмов нечеткого вывода // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 6(162). С. 133–141.
23. Марценюк М.А. Матричное представление нечеткой логики // *Нечеткие системы и мягкие вычисления. Научный журнал Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений*. 2007. Т. 2. № 3. С. 7–35.

REFERENCES

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets, *Information and Control*, 1965, Vol. 8, Pp. 338–353.
2. Mohammadian M., Sarker R.A., Yao X. *Computational intelligence in control*. Idea Group Publishing, 2003.
3. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*

- [*Fuzzy logic modelling and control*], Moscow: Binom Publ., 2009, 798 p. (rus)
4. Santos E. Maximin automata, *Information and Control*, 1968, Vol. 13, Pp. 363–377.
5. Topencharov V., Stoeva S. Fuzzy-topological automata, *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, Vol. 16,

Issue 1, Pp. 65–74.

6. **Reyneri L.M.** An Introduction to Fuzzy State Automata. Biological and Artificial Computation: From Neuroscience to Technology, *Lecture Notes in Computer Science*, 1997, Vol. 1240, Pp. 273–283.

7. **Malik D.S., Mordeson J.N., Sen M.K.** Minimization of fuzzy finite automata, *Information Sciences*, 1999, Vol. 113(3-4), Pp. 323–330.

8. **Mordeson J.N., Malik D.S.** *Fuzzy automata and languages: theory and applications*. Chapman & Hall/CRC, 2002.

9. **Belohlavek R., Krupka M.** *Approximate minimization of fuzzy automata*. Palacky University, 2007.

10. **Bartolomiej P.** A traffic model based on fuzzy cellular automata, *Journal of Cellular Automata*, 2013, Vol. 8, No. 3-4, Pp. 261–282.

11. **Micic I., Jancic Z., Ignjatovic J, Ciric M.** *Determinization of fuzzy automata by means of the degrees of language inclusion*. Available: <http://arxiv.org/abs/1410.6063> (Accessed 09.12.2014).

12. **Brauer Yu.** *Vvedenie v teoriyu konechnykh avtomatov*. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1987, 392 p. (rus)

13. **Karpov U.G.** *Teoriya avtomatov*. St. Petersburg: Piter Publ., 2003, 208 p. (rus)

14. **Martsenyuk M.A.** Operatorno-logicheskie shemi kak sredstvo isucheniya algoritmov v ychebnih kursah po matematike i informatike, *Prikladnaya matematika [Science journal of applied informatics]*, 2010, No. 5(23), Pp. 43–54. (rus)

15. **Hopkroft D., Motvani R., Ulman D.** *Vvedenie v teoriyu avtomatov, yazykov i vyichisleniy [Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation]*. Moscow: Vilyams Publ., 2002, 528 p. (rus)

16. **Berstel J., Boasson L., Carton O., Fagnot I.**

Minimization of Automata, Automata: from Mathematics to Applications, European Mathematical Society. Available: <http://arxiv.org/abs/1010.5318> (Accessed 09.12.2014).

17. **Campeanu C.** Simplifying Nondeterministic Finite Cover Automata, *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, 2014, Vol. 151, Pp. 162–173.

18. **Anderson J.A.** *Automata Theory with Modern Applications*. Cambridge University Press, 2006.

19. **Lei H., Li Y.M.** Minimization of states in automata theory based on finite lattice-ordered monoids, *Information Sciences*, 2007, Vol. 177(6), Pp. 1413–1421.

20. **Mamdani E.H.** Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant, *In Proc. IEEE*, 1974, Pp. 121–159.

21. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and applications to modelling and control, *IEEE Trans. On SMC* 15, 1985, Pp. 116–132.

22. **Martsenyuk M.A., Polyakov V.B., Seletkov I.P.** Matrichnaya realizatsiya algoritmov nechetkogo vyivoda [Matrix Implementation of Fuzzy Inference Algorithms], *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control System]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 6(162), Pp. 133–141. (rus)

23. **Martsenyuk M.A.** Matrichnoe predstavlenie nechetkoy logiki [Matrix Representation of Fuzzy Logic], *Nechetkie sistemy i myagkie vyichisleniya. Nauchnyy zhurnal Rossiyskoy assotsiatsii nechetkikh sistem i myagkikh vyichisleniy [Fuzzy Systems and Soft Computing. Science Journal of Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing]*, 2007, Vol. 2, No. 3, Pp. 7–35. (rus)

МАРЦЕНЮК Михаил Андреевич – заведующий кафедрой компьютерных систем и телекоммуникаций Пермского государственного национального исследовательского университета, доктор физико-математических наук.

614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15.

E-mail: mrcn@psu.ru

MARTSENYUK, Mikhail A. Perm State University.

614113, Bukireva Str. 15, Perm, Russia.

E-mail: mrcn@psu.ru

СЕЛЕТКОВ Илья Павлович – аспирант кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций Пермского государственного национального исследовательского университета.

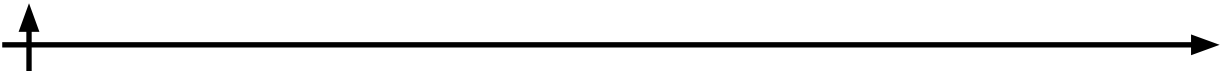
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15.

E-mail: iseletkov@gmail.com

SELETKOV, Ilya P. Perm State University.

614113, Bukireva Str. 15, Perm, Russia.

E-mail: iseletkov@gmail.com



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

УДК 656, 004.8, 007.5, 51-7, 510.67

Я.А. Селиверстов, А.Л. Стариченков

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ

Ya.A. Seliverstov, A.L. Starichenkov

CONSTRUCTION OF A MODEL OF URBAN TRAFFIC IN CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY

Построение формальной модели городской транспортной системы произведено в логико-алгебраической интерпретации, увязанной с графоаналитической моделью городской транспортной сети, введена модель функционально-полного операторного базиса системы управления городской транспортной системой, опирающаяся на ориентиры пользователя и целевые ориентиры городской транспортной системы. В целевые ориентиры пользователя уложены первый принцип Вардроп и принцип безопасного следования, в целевые ориентиры городской транспортной системы уложен второй принцип Вардроп и принцип надежного функционирования. Последовательно выстроена модель управления динамическими транспортными потоками мегаполиса. Произведена проверка адекватности предлагаемой модели.

МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; УПРАВЛЕНИЕ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ; УПРАВЛЕНИЕ ГОРОДСКОЙ МОБИЛЬНОСТЬЮ НАСЕЛЕНИЯ; ГОРОДСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ.

A formal model of the urban transport system is made with the logic-algebraic interpretation, it bound to the graph-analytical model of the urban transport network, after it a model of functionally complete operator basis of control of the urban transport system based on function of control of movement of the urban population is introduced here. Function of control of traffic consists of two principles Wardrop and two new principles, which are described here. The model for controlling the dynamic traffic of the metropolis is consistently built here. The adequacy of the models is demonstrated by numerical examples.

MODEL CONTROL SYSTEMS OF DYNAMIC TRAFFIC; INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS; TRAFFIC CONTROL; CONTROL OF URBAN MOBILITY; URBAN TRANSPORT SYSTEMS; SELF-ORGANIZING MODEL TRANSPORT FLOWS.

В основе систем управления (СУ) городскими транспортными потоками (ТП) лежат математические и программно-алгоритмические модели. К настоящему времени уже разработаны транспортные модели, которые с определенной степенью достоверности отображают реальные транспортные процессы [3]. С их исполь-

зованием вычисляются потоки и загрузка элементов сети, составляется расписание движений общественного пассажирского и грузового транспорта, выполняется локальное управление активными элементами транспортной сети с целью перераспределения транспортных потоков на особо загруженных участках.

Устойчивая тенденция последовательного внедрения отдельных составляющих информационных систем управления дорожным движением в практику организации городского транспортного процесса в мегаполисах России не сумела качественно повысить безопасность и управляемость дорожного движения [1, 2]. Поэтому в данной статье производится построение моделей управления городскими транспортными потоками, позволяющих устранить описанные выше недостатки.

Анализ предметной области. В настоящее время исследованиями моделей управления городскими транспортными потоками заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ можно отметить следующие. В [3–8] представлены различные подходы к исследованию ТП с помощью теории экономического равновесия, а также подробно изложены математические методы моделирования ТП на макро- и микроуровнях. В работе [9] изучена проблема нахождения оптимальных управленческих стратегий распределения ТП, равновесных по Вардропу, на сети из параллельных каналов с линейной BPR-функцией задержки. В [10] рассмотрены линейные, гравитационные, и энтропийные модели распределения ТП. В [11] предложен подход к управлению ТП на улично-дорожной сети (УДС) мегаполиса на основе равновесия по Штакельбергу в построенной двухуровневой конфликтной игре между провайдерами навигационных услуг и администрации мегаполиса. В [12] осуществлено построение комбинированной модели ТП на основе энтропийного равновесного расщепления и распределения ТП. В [13] рассмотрено построение графовой модели для решения задачи маршрутизации при распределении пассажирских и ТП, учитывающей специфику перемещений пассажиров в крупных городах. В [14] описаны математические модели оптимизации структуры системы управления транспортной компании.

Постановка проблемы. Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии теоретических и прикладных методов, а также подходов

в построении интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Многие проблемы управления ТП мегаполиса в модельной интерпретации ИТС [15] удалось разрешить программно-алгоритмически, но эффективность СУ в реальной городской транспортной системе (ГТС) остается предельно низкой. Именно поэтому задача построения моделей управления городской транспортной мобильностью населения, обеспечивающей снижение влияния неопределенности внешней информационной среды на устойчивость городского транспортного процесса, остается актуальной.

Формальная модель городской транспортной системы. Городскую транспортную систему (TS) зададим согласно [16] множеством взаимосвязанных объектов различных классов, которые в общем виде будем называть элементами ГТС:

$$TS : \mathcal{E} = \{\varepsilon_i, i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где TS – транспортная система; ε_i – элемент ГТС.

Классы на множестве объектов ГТС зададим процедурой разбиения f_Ψ^d множества TS на непересекающиеся совокупности подмножеств следующего вида:

$$f_\Psi^d : TS = \bigcup_{\psi} TS_\psi, \quad |TS_\psi| = d_\psi, \quad (2)$$

где $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_N\}$ – классы разбиения; $d_\psi = 1, \dots, N$ – глубина классов разбиения (количество подклассов в каждом классе).

Классами объектов ГТС выступают функционально отличные совокупности элементов ГТС, такие как объекты транспортной инфраструктуры (To), пользователи транспортной сети (H), улично-дорожные транспортные сети (Ts), транспортные средства (Tr), грузы (Gr), средства перевозки грузов (Tg), средства управления транспортным процессом (Tc), инфраструктурные объекты жизнедеятельности (O).

Графическая интерпретация подобного классового разбиения представлена на рис. 1.

Для данной классификации $\Psi = \psi_1, \dots, \psi_7$, а выражение (2) примет следующий вид:

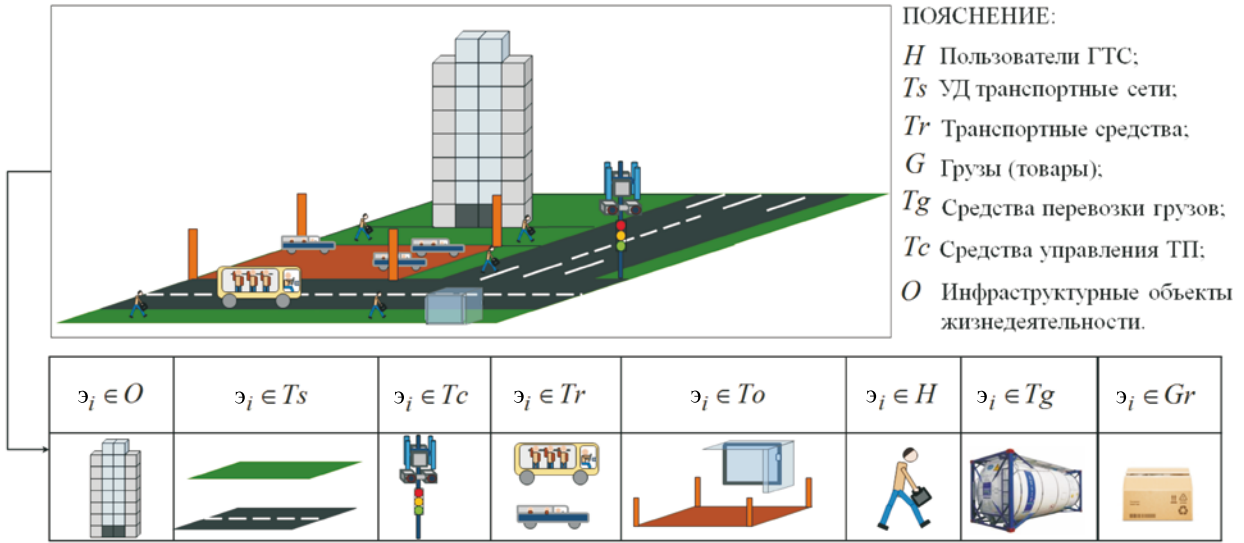


Рис. 1. Классы объектов ГТС

$$f_{\psi}^d : TS = \bigcup_{\psi_1}^{\psi_7} TS_{\psi} = H \cup O \cup To \cup Ts \cup Gr \cup Tg \cup Tc. \quad (3)$$

Реализация процесса управления транспортной мобильности в ГТС обуславливает процедуру идентификации ее элементов.

В общем виде идентификационной нумерацией элементного множества TS будем называть всюду определенное отображение f_N , которое каждому объекту из TS ставит уникальный номер из I , вида

$$f_N : TS \rightarrow I, \quad (4)$$

где $I = \{id_{\eta}\}$ – множество уникальных номеров.

Параметризацию элементного множества TS зададим оператором f_{CH} , который каждому объекту в сети ставит в соответствие набор характеристик, присущих данному объекту. Процедура параметризации имеет вид:

$$f_{CH} : TS \rightarrow CH, \quad (5)$$

где $CH = \{ch_{\pi}^{\exists_i}, \pi = 1, \dots, n; i = 1, \dots, N\}$ – множество характеристик элементов ГТС.

Характеристика $ch_{\pi}^{\exists_i}$ задается кортежем $ch_{\pi}^{\exists_i} = \langle \text{name}, \{\text{value}\} \rangle$, где name – имя π -й характеристики, $\{\text{value}\}$ – область допустимых значений. Область допустимых значений задается перечислением этих зна-

чений, интервалом или функционально, с помощью правил вычисления (измерения) и оценки.

Динамику процессов ГТС зададим временным оператором f_T , который каждому объекту из TS ставит в соответствие определенный момент или интервал времени из T , в следующем виде:

$$f_T : TS \rightarrow [\tau_T^{\text{def}} \vee (\tau_T; \tau_{T+1})], \quad (6)$$

где T – множество моментов или интервалов времени, на котором задано отношение строгого порядка, то есть $\tau_1 < \tau_2, \dots, \tau_T < \tau_{T+1}$; $\tau_T^{\text{def}} \in T$ – определенный момент времени; $(\tau_T; \tau_{T+1}) \in T$ – определенный интервал времени.

Элементы реальной ГТС в информационном представлении модели будем называть агентами [15] вида $A = \{a_i, i = 1, \dots, N\}$.

Зададим отображение f^{TS-A} , которое каждому элементу из TS ставит в соответствие агента из A , т. е.

$$f^{TS-A} : TS = \{\exists_i, i = 1, \dots, N\} \rightarrow A = \{a_i, i = 1, \dots, N\}, \quad (7)$$

а условие элементного соответствия примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N \exists_i = \sum_{i=1}^N a_i. \quad (8)$$

Таким образом, множества $|TS| = |A|$ равномощны.

Городская транспортная сеть задается графом $\Gamma^T(V; E) \subset B_i(TS)$, где $TI = (To \cup Ts \cup O)$ с множеством вершин $V = \{v\}$ и множеством дуг сети $E = \{e\}$.

Во множестве вершин $V = \{v\} \subseteq A \subset B_i(TS)$ выделим два подмножества: зарождения ТП — $S \subseteq V$ и поглощения транспортных потоков (стоки) — $D \subseteq V$, удовлетворяющие следующему условию:

$$D, S \subseteq [To \cup Ts \cup O] \subset TS. \quad (9)$$

Подмножество $S \subseteq V$ содержит элементы ГТС, порождающие ТП; подмножество $D \subseteq V$ содержит элементы ГТС, поглощающие ТП.

Множество потокообразующих пар отправления-прибытия задается декартовым произведением следующего вида:

$$W = \{w = (\partial; \alpha) : \partial \in S, \alpha \in D\}. \quad (10)$$

Тогда матрица транспортных корреспонденций будет задаваться массивом $\{\rho_w : w \in W\}$, в котором каждой паре отправление-прибытие $w = (\partial; \alpha) \in W$ будет поставлен в соответствие ρ_w определенный объем, пользователей (пассажиров, транспортных средств), которые из пункта ∂ (отправления) должны прибыть в пункт α (прибытие).

Маршрут (путь), соединяющий вершины ∂ и α , задается последовательностью дуг (перегонов УДС) вида

$$e_1 = (\partial = \pi_0 \rightarrow \pi_1), e_2 = (\pi_1 \rightarrow \pi_2), \dots,$$

$$e_{L-1} = (\pi_{L-2} \rightarrow \pi_{L-1}), e_L = (\pi_{L-1} \rightarrow \pi_L = \alpha),$$

где $e_\gamma \in E$ при всех $\gamma = 1, \dots, L + 1$.

Множество альтернативных маршрутов, следуя которым для каждой пары $w = (\partial; \alpha) \in W$, выходящий из пункта отправления ∂ поток достигает пункта прибытия α , определяется следующим образом:

$$P_w = \bigcup_{i=1}^N p_i = \bigcup_i \bigcup_l e_{il}. \quad (11)$$

Введем величину x_p потока, следуемого по пути $p \in P$, такую, что для каждой пары w потоки x_p удовлетворяют следующему условию:

$$X_w = \left\{ x_p \geq 0 : p \in P_w, \sum_{p \in P_w} x_p = \rho_w \right\}. \quad (12)$$

Введем количественную величину y_e потока, следуемого по дуге $e \in E$ в момент времени $t \in T$. Тогда поток на пути вычисляется следующим образом:

$$x_p = \sum_{e \in P} \Theta_{ep} y_e, \quad (13)$$

где

$$\Theta_{ep} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } e \text{ проходит} \\ & \text{через путь } p; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Определим $\Theta = (\Theta_{ep} : e \in E, p \in P)$ — матрицу инцидентности дуг и путей, $y = (y_e : e \in E)$ — вектор, описывающий загрузку дуг сети. В матричной форме взаимосвязь потоков по путям и дугам описывается уравнением $y = \Theta x$, подробнее см. [3].

Обозначим через $G_p = \{g_p\}$ удельные затраты пользователей на проезд по пути p . Поскольку на затраты по одному маршруту может влиять загрузка других путей, то последние G_p представляют собой функции от загрузки всей сети, то есть $G_p = G_p(X)$.

Модель функционально-полного операторного базиса ГТС. Функционально-полный операторный базис ГТС управления содержит операторы измерения f_M , регулирования f_R и планирования f_P :

$$f_C = \langle f_M; f_R; f_P \rangle, \quad (14)$$

Оператор измерения состояния $f_M = \{f_M^{\partial_i}\} = f_N \cup f_{CH} \cup f_T \cup f^{TS-A}$ каждому объекту $\partial_i \in TS$ ГТС в момент или интервал времени из T при воздействии $e_{\partial_i}(t)$ ставит в соответствие регистрируемое состояние $s_{\partial_i}(t)$ вида:

$$\forall \partial_i \in TS \exists f_M^{\partial_i} : [t; e_{\partial_i}(t); \partial_i] \rightarrow [t, e_{\partial_i}(t), s_{\partial_i}(t)], \quad (15)$$

где $s_{\partial_i}(t) = t \times id_i \times a_i \times ch_{\pi}^{\partial_i}$ — состояние ОУ, которое задается декартовым произведением или кортежем на множествах TS, I, A, CH, T и отображает реальное состояние ОУ ГТС в модельной интерпретации; $e_{\partial_i}(t) = t \times id_j \times a_j \times ch_{\pi}^{\partial_j}, j = 1, \dots, J$ — воздействие на ОУ задается декартовым произведением или кортежем на множествах TS, I, A, CH, T и отображает состоя-

ние j -х объектов и факторов ГТС, оказывающих воздействие на ОУ.

Оператор регулирования состояний ОУ ГТС $f_R = \{f_R^{\varepsilon_i}\} = f_R^H \cup f_R^{TC}$ каждому объекту $\varepsilon_i \in TS$ ГТС в момент или интервал времени из T ставит в соответствие регулирующее воздействие $r_{\varepsilon_i}(t) \in U(TS)$, вида

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_R^{\varepsilon_i} : R(TS) \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R), (16)$$

где $f_R^{\varepsilon_i}$ – оператор регулирования состояний ОУ ГТС; $R(TS)$ – множество регулирующих воздействий доступных СУ ГТС; $r_{\varepsilon_i}(t_R)$ – регулирующее воздействие, поданное на ОУ $\varepsilon_i \in TS$ в момент $t_R \in T$; f_R^H – оператор регулирования состояний для пользователя ГТС; f_R^{TC} – оператор регулирования состояний для ОУ ГТС.

Оператор планирования состояний ОУ ГТС $f_{\Pi} = \{f_{\Pi}^{\varepsilon_i}\} = f_{\Pi}^H \cup f_{\Pi}^{TS/H}$ каждому объекту $\varepsilon_i \in TS$ ГТС в момент или интервал времени из T в ситуации $sit_0^{\varepsilon_i}(t) = s_{\varepsilon_i}(t) \cup e_{\varepsilon_i}(t)$ ставит в соответствие целевое состояние $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$ в момент времени $t_p \in T$, то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{\Pi}^{\varepsilon_i} : sit_0^{\varepsilon_i}(t) \rightarrow s_p^{\varepsilon_i}(t_p), (17)$$

где $f_{\Pi}^{\varepsilon_i}$ – оператор планирования состояний ОУ ГТС; $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$ – ситуация, в которой находится ОУ ГТС в момент времени $t \in T$; $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$ – целевое состояние ОУ ГТС в момент $t_p \in T$; f_{Π}^H – оператор планирования состояний для пользователя ГТС; $f_{\Pi}^{TS/H}$ – оператор планирования состояний для объектов ГТС, кроме пользователей.

Оценка соответствия состояния ГТС требуемому состоянию реализуется через оператор контроля состояний f_{CS} следующего вида:

$$f_{CS} = \langle f_M \cup f_{\psi}^d; E_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i}; r_{\varepsilon_i}(t_R) \rangle, (18)$$

где f_M – оператор измерения состояния ОУ; f_{ψ}^d – оператор классификации; $r_{\varepsilon_i}(t_R)$ – регулирующее воздействие или величина отклонения текущего состояния от требуемого; $E_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i} \in TS$ – множество элементов ГТС, оказывающих влияние на объект ε_i .

Оператор контроля f_{CS} содержит систему функций, обеспечивающих определение состояния ОУ (измерение, сбор, уточнение данных об объекте управления) и оценку степени отклонения текущего состояния от

требуемого по заданным критериям эффективности.

Тем самым оператор контроля f_{CS} для каждого ε_i объекта ГТС, находящегося в состоянии $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$ в момент времени из T , вычисляет величину отклонения $r_{\varepsilon_i}(t_R)$ от требуемого состояния $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$, то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{CS}^{\varepsilon_i} : |sit_0^{\varepsilon_i}(t) - s_p^{\varepsilon_i}(t_p)| \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R). (19)$$

Тогда в зависимости от оператора контроля f_{CS} функционально-полный операторный базис ГТС способен реализовывать функционал управления на режимах оптимального управления, допустимого управления и потери управления, то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, f_T, f_{CH}, t = def \exists f_C, U(TS) / \left\{ \begin{array}{l} f_C^{opt}, U(TS)_{opt} \rightarrow \{ch_{\pi}^{AL}\} < \{ch_{\pi}^{rand}\} < \{\overline{ch_{\pi}^{AL}}\} \\ f_C^{AL}, U(TS)_{AL} \rightarrow \{ch_{\pi}^{rand}\} \in CH_{\pi}^{AL} \\ f_C^F, U(TS)_F \rightarrow \{ch_{\pi}^{rand}\} \notin CH_{\pi}^{AL} \end{array} \right. , (20)$$

где f_C – оператор управления ГТС; f_C^{opt} – оператор оптимального управления; f_C^{AL} – оператор допустимого управления; f_C^F – оператор потери управления; $\{ch_{\pi}^{AL}\}$ – значения нижней границы множества параметров оптимального управления; $\{\overline{ch_{\pi}^{AL}}\}$ – значения верхней границы множества параметров оптимального управления; $\{ch_{\pi}^{rand}\}$ – значения множества π -х параметров; CH_{π}^{AL} – область допустимого управления; $U(TS)$ – вектор состояния ГТС; $U(TS)_{opt}$ – ГТС в состоянии оптимального управления; $U(TS)_{AL}$ – ГТС в состоянии допустимого управления; $U(TS)_F$ – ГТС в состоянии потери управления.

Целевая функция управления процессами мобильности в ГТС. Построение модели управления динамическими ТП целесообразно осуществлять на принципах распределенной СУ, обеспечивающих рациональную самоорганизацию.

В основе модели управления городскими ТП лежит целевая функция управления процессами мобильности в ГТС, реализацию которой осуществляет функционально-полный операторный базис управления.

Целевая функция управления процес-

сами мобильности формируется под воздействием двух составляющих: целевых ориентиров пользователей $P(H)$ и целевых ориентиров ГТС $P(TS / H)$.

Целевые ориентиры пользователей опираются на первый аксиоматический принцип Вардропа и аксиоматический принцип безопасного следования:

- пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным транспортным расходам ГТС (первый аксиоматический принцип Вардропа), то есть

$$\forall h \in H, h \rightarrow w(\partial; \alpha), w(\partial; \alpha) \rightarrow p : p \in P_w, \\ x_p > 0, \Rightarrow G_p(x) = \min_{p \in P_w} G_p(x_p) = g_w(x_\Sigma), \quad (21)$$

где $p = e_{1=H}, e_2, \dots, e_{t=K}$; $g_w(x_\Sigma)$ – минимальные транспортные затраты по маршрутам, соединяющим пару $w \in W$, при загрузке сети, определяемой вектором x_Σ ;

- продвижение пользователя по пути с минимальными транспортными расходами осуществляется в динамической области безопасной транспортной мобильности.

Под динамической областью безопасной транспортной мобильности понимается область движения $D_{h_i}^S$, выбираемая пользователем самостоятельно, исходя из имеющейся информации $I_{TS}^{h_i}$ об участни-

ках процесса транспортной мобильности, правилах дорожного движения и состоянии транспортной инфраструктуры, посредством функции информационного обеспечения, вида

$$\forall h_i \in H, w(\partial; \alpha), p = e_{1=H}, \dots, \\ e_{t=K} \exists f_{h_i}^S(I_{TS}^{h_i}) \Big|_{t=def} : h_i \rightarrow D_{h_i}^S(e_{def}). \quad (22)$$

Функция информационного обеспечения $f_{h_i}^S(I_{TS}^{h_i})$ формируется СУ ГТС и предоставляет участникам транспортного процесса информацию о динамической области безопасной транспортной мобильности в следующем виде:

$$D_{h_i}^S \Big|_{t=def} = \left\langle \bigcup_{cl}^{CL} \bigcup_{\psi}^{\Psi} \Theta_{\psi cl} \right\rangle_{t=def} = \\ = \left\langle \frac{(\{\Theta_{11}\} \cup \dots \cup \{\Theta_{\psi 1}\}) \cup \dots}{color_{i=1}} \right\rangle_{t=def} \quad (23) \\ \dots \cup \frac{(\{\Theta_{1CL}\} \cup \dots \cup \{\Theta_{\psi CL}\})}{color_{i=Z}} \Big|_{t=def},$$

где $D_{h_i}^S$ – динамическая область безопасной транспортной мобильности; $\Theta = \{\Theta_i\}$ – эле-

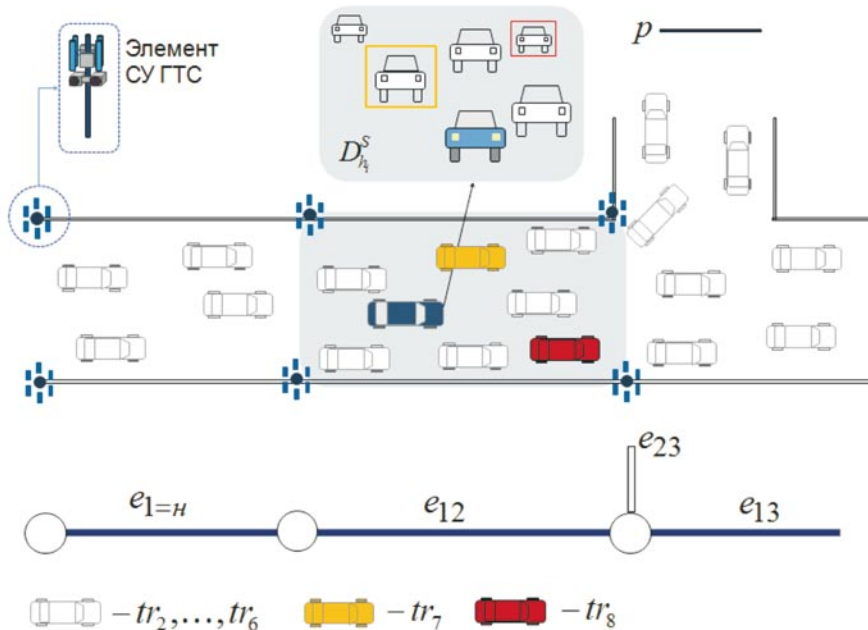


Рис. 2. Динамическая область безопасной транспортной мобильности

менты ГТС; $CL = \{cl_i\}$ – классы опасности; $\Psi = \{\psi_i\}$ – классы ГТС; $t = def$ – определенный момент времени; U – индекс, указывающий на СУ ГТС.

Поясним выражение (23) на практическом примере 1.

Пример 1. Участник транспортного движения h_1 , управляя ТС $\varepsilon_{h_1} = tr$, совершает продвижение по пути e_{def} . Руководствуясь рис. 2, необходимо определить динамическую область безопасной транспортной мобильности $D_{h_1}^S$ в момент времени $t = t_{def}$. Для простоты будем считать, что СУ ГТС разбивает элементы ГТС на три класса опасности: $CL = \{cl_i, i = 1, 2, 3\}$; $|CL| = 3$ таких, что 1 = бесцветный; 2 = желтый; 3 = красный, а в динамической области безопасной транспортной мобильности (см. рис. 2) находятся подвижные транспортные объекты одного класса ψ – «легковые автомобили» в количестве tr_2, \dots, tr_8 .

Решение. Подставим в выражение (23) исходные данные, в итоге получим:

$$D_{h_1}^S \Big|_{t=def}^U = \left\langle \bigcup_{cl} \bigcup_{\psi} \varepsilon_{\psi cl} \right\rangle_{t=def}^U = \left\langle \frac{(\{tr_2; tr_3; tr_4; tr_5; tr_6\})}{color_{i=1}} \cup \frac{(\{tr_7\})}{color_{i=2}} \cup \frac{(\{tr_8\})}{color_{i=3}} \right\rangle_{t=def}^U.$$

Таким образом, участник транспортного процесса h_1 посредством СУ ГТС, располагая необходимой информацией о потенциальной опасности, исходящей от других участников транспортного процесса, самостоятельно выбирает траекторию движения в ТП в границах участка УДС.

Целевые ориентиры ГТС опираются на второй аксиоматический принцип Вардропы и аксиоматический принцип надежного функционирования ГТС:

- пользователи сети выбирают маршруты следования исходя из минимизации общих транспортных расходов (ОТР) ГТС (второй аксиоматический принцип Вардропы);

- ГТС в процессе движения пользователей функционирует в области допустимой надежности.

Покажем, что первый и второй прин-

ципы Вардропы имеют общий системный оптимум, представляющий собой функционал, минимизирующий время ожидания участников транспортного процесса на городской УДС, т. е. чем быстрее пользователь прибудет из пункта отправления в пункт назначения, тем меньше будет величина ОТР.

Обозначим через $G_{ГТС}$ общие транспортные расходы за период T , выделим в них переменную часть $G_{VAR}^{ГТС}$, которая зависит от динамических характеристик транспортного потока, и постоянную часть $G_{CONST}^{ГТС}$, которая зависит только от внешних факторов:

$$G_{ГТС} \Big|_T = [G_{ГТС}^{\Delta} + G_{ГТС}^{\nabla}] \Big|_T = [G_{TF} + G_{EF}^{ГТС}] \Big|_T \rightarrow \min, \quad (24)$$

где $G_{ГТС}$ – ОТР; $G_{ГТС}^{\Delta}$ – переменная составляющих ОТР; $G_{ГТС}^{\nabla} = G_{EF}^{ГТС}$ – постоянная составляющих ОТР, эквивалентная расходам, связанным с влиянием внешних факторов; G_{TF} – ОТР, зависящие от динамических характеристик транспортного потока; TF – индекс транспортного потока.

Множество ПТО в обозначениях (3) представляет собой выражение $TF = TR \cup H \cup Gr \cup Tg$.

Отбросим постоянную часть ОТР, тогда:

$$G_{ГТС} \Big|_T \sim G_{TF} \Big|_T. \quad (25)$$

Рассмотрим подробнее характеристики, от которых зависит G_{TF} . Таковыми, согласно [11], являются: величина потока – X , интенсивность движения потока – M , время движения потока – TM , добротность перемещения потока по сети ГТС – QM ; пропускная способность сети – CM . Таким образом, G_{TF} примет следующий вид:

$$G_{TF} = G_{TF}(X; M; TM; QM; CM). \quad (26)$$

Согласно [11] множеству показателей $[X; M; TM; QM; CM]$ соответствует интегральный показатель $TM(X)$ – время движения ТП, следовательно, возможен переход следующего вида:

$$G_{TF}(X; M; TM; QM; CM) \sim G_{TF}(TM(X)), \quad (27)$$

где X – величина ТП; M – интенсивность ТП; TM – время движения ТП; QM – добротность перемещения ТП; CM – пропускная способность ГТС.

Тогда зависимость (27) может быть выражена через функцию ограничений движения по времени [18, 19] вида:

$$tm_i = \tau_i^0 \left[1 + a \left(\frac{fx_i}{cm_i} \right)^b \right], \quad (28)$$

где τ_i^0 – время свободного движения по i -му пути; fx_i – ТП на i -м пути; $cm_i > 0$ – пропускная способность i -го пути; $tm_i > 0$ – время прохождения ТП по i -му пути; a, b – калибровочные коэффициенты.

Переходя от одного пути к целостной ГТС, второй принцип Вардропа становится достижимым при оптимизации с ограничениями, параметрическое решение которой выглядит как

$$TM = \min_{fx} \sum_{i=1}^N \tau_i^0 \left[1 + a \left(\frac{fx_i}{cm_i} \right)^b \right], \quad (29)$$

$$X = \sum_i^N fx_i, \quad fx_i \geq 0,$$

где $fx = (fx_1, \dots, fx_i, \dots, fx_n)$ – вектор распределения ТП X по путям.

Следовательно, сопоставляя (21) и (29), получим условие оптимума по времени следующего вида:

$$g_w(x_\Sigma) \sim \min[tm_w(x_\Sigma)], \quad (30)$$

т. е. временные затраты g_w на прохождение транспортного потока x_Σ по маршруту, соединяющему пару $w \in W$, должны быть минимальны.

В условиях реального времени соблюдение участником дорожного движения (ДД) целевых ориентиров пользователя и ГТС идет через принятие решения о выборе кратчайшего по времени маршрута движения из пункта отправления в пункт назначения. Кратчайший по времени маршрут вычисляется бортовым навигатором ТС или персональным планировщиком участника ТП с использованием информации, полученной от городской системы транспортно-

логистического мониторинга.

Городская система транспортно-логистического мониторинга предоставляет оперативную информацию о средней скорости на участках УДС в интересующий пользователя интервал времени, а бортовая система вычисляет кратчайший по времени путь с использованием алгоритмов Форда-Беллмана или Дейкстры [20].

В условиях реального времени выражение (28) имеет следующий вид:

$$tm_i \Big|_{\tau=def} = \frac{S_i}{V_i^{cp}} \Big|_{\tau=def} =$$

$$= \begin{cases} n_i \leq n_i^{lim} & V_i^{cp} \Big|_{\tau=def} = V_i^{измер} \Big|_{\tau=def} \leq V_i^{доп} \\ n_i > n_i^{lim} & V_i^{cp} \Big|_{\tau=def} = V_i^{измер} \Big|_{\tau=def} \end{cases}, \quad (31)$$

а задача оптимизации (29) имеет вид:

$$U_h^{cy ГТС} \Big|_{\tau=def} : \left[\{tm_i(p_i)\}_i^N \rightarrow \min_{\{p_i\}} tm_i(p_i), \quad (32)$$

$$P_{w=(\partial;\alpha)} = \{p_i\} \Big|_{\tau=def},$$

где $U_h^{cy ГТС}$ – функционал БС ТС; $\{tm_i(p_i)\}$ – временное множество прохождения пути из точки отправления ∂ в точку назначения α маршрутами $\{p_i\}$; $\tau = def$ – время обращения пользователя h_i к бортовой системе (БС) транспортного средства.

Поясним выполнение первого целевого ориентира ГТС на примере нахождения кратчайшего по времени маршрута для пользователя, планирующего из точки отправления ∂ прибыть в пункт назначения α .

Пример 2. Участник ДД h_i на ТС, находясь на перекрестке ул. Орджоникидзе и пр. Гагарина, планирует прибыть в район встречи, находящийся в Парке Победы (рис. 3 а). Технические характеристики УДС, ТС и транспортная обстановка известна (рис. 3 б). Необходимо определить путь, который будет рекомендован СУ ГТС участнику ДД, и его расчетные характеристики.

Решение. Располагая информацией



Рис. 3. Выбор маршрута – а; регистрация скорости потока ТС на УДС – б

о местонахождении пункта прибытия участника ДД, скорости движения ТП на участках УДС в реальном времени, а также технических характеристиках УДС, бортовая система транспортного средства участника ДД – навигатор – построит оптимальный путь следования. Граф возможного пути следования участника ДД представлен на рис. 4. Участник ДД должен из вершины 4 прибыть в вершину 7. Оптимизация

маршрута следования может быть выполнена СУ ГТС по параметру расстояния или по параметру времени. Для объективности выполним оптимизацию маршрута по обоим параметрам. Кратчайший маршрут вычислим с помощью алгоритма Форда–Беллмана и Дейкстры [19]. Обратим внимание на тот факт, что в случае оптимизации маршрута по одному из параметров, например, расстоянию, СУ ГТС может

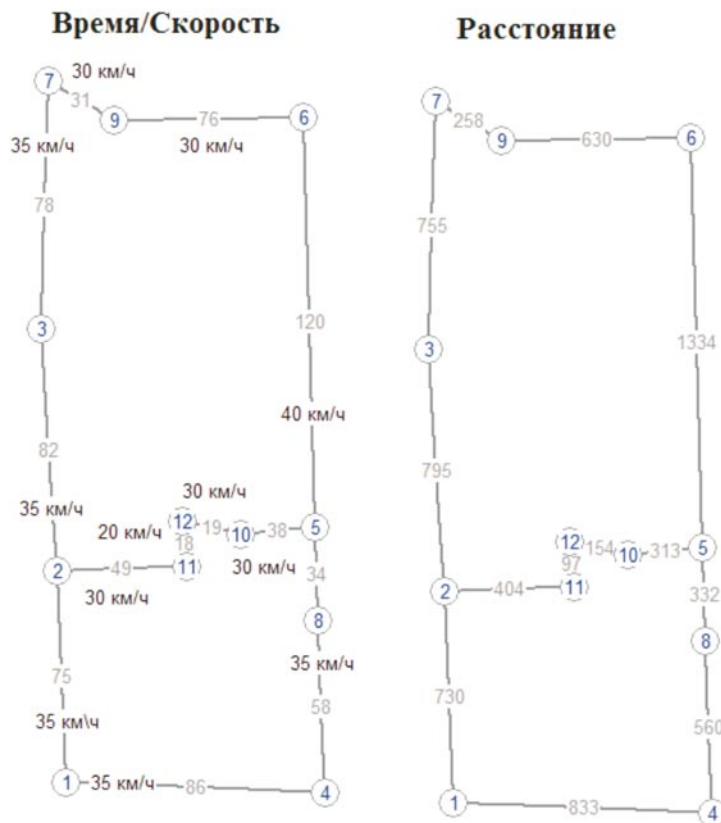


Рис. 4. Граф маршрута ТС

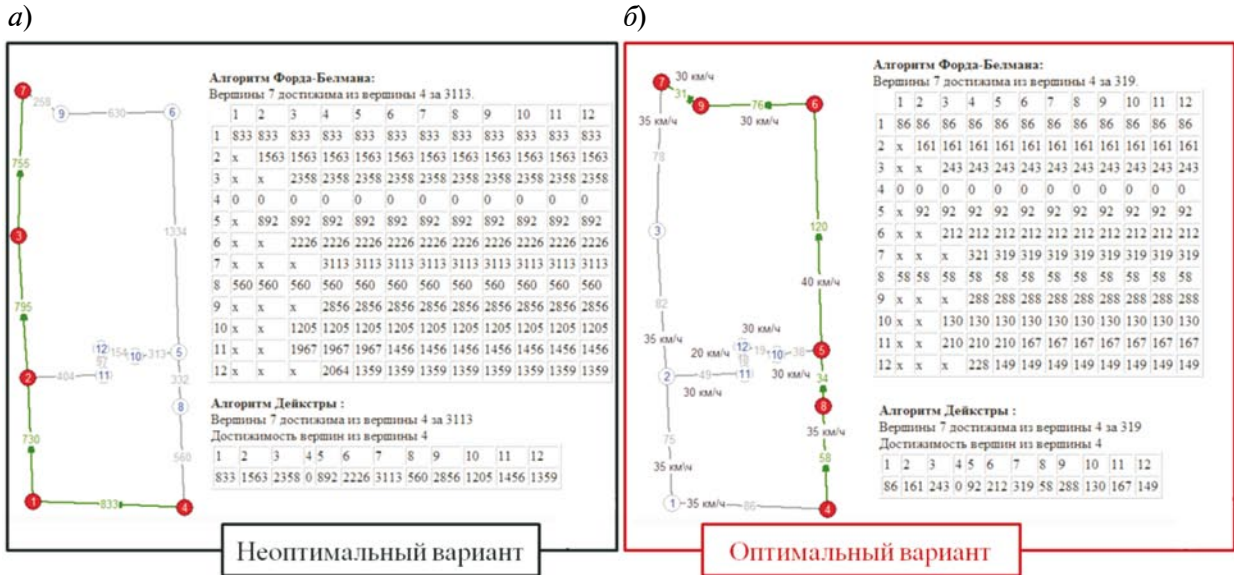


Рис. 5. Кратчайший путь по расстоянию – а; кратчайший путь по времени – б

предложить участнику ДД маршрут 4-1-2-3-7 протяженностью 3133 м (рис. 5 а). Однако, руководствуясь первым целевым ориентиром ГТС и первым целевым ориентиром пользователя, система произведет расчет с учетом (30)–(32), выбрав в качестве критерия оптимизации «время следования», и, таким образом, предложит участнику ДД оптимальный маршрут следования 4-8-5-6-9-7 длительностью 319 с (рис. 5 б).

Рассмотрев первый целевой ориентир СУ ГТС, перейдем к рассмотрению второго целевого ориентира СУ ГТС.

Множество значений характеристик CH^{γ_i} объекта γ_i разбивается на допустимые и недопустимые, в соответствии со следующим выражением:

$$CH^{\gamma_i} = CH_{\gamma_i}^{AL} \cup CH_{\gamma_i}^{IR}, \quad (33)$$

где γ_i – объекты ГТС такие, что $\gamma_i \in (Ts \cup To \cup Tc)$; $CH_{\gamma_i}^{AL}$ – множество допустимых значений характеристик CH^{γ_i} (AL – allowable – допустимый); $CH_{\gamma_i}^{IR}$ – множество недопустимых значений характеристик CH^{γ_i} (IR – irremissible – недопустимый).

Таким образом, формируется область допустимых и предельных значений параметров объектов ГТС, отклонение от которых влечет к ухудшению работы и потере

управляемости ГТС.

Условие работоспособности ГТС в области допустимой надежности запишем в следующем виде:

$$\forall \gamma_i \in (Ts \cup To \cup Tc), f_M; f_R; f_{\Pi}; f_{CS}; f_{\Psi}^d, \forall t, \quad (34)$$

$$\exists f_C : u_{\gamma_i} \xrightarrow{r_{\gamma_i}^p(t)} \{ch_{\pi}^{\gamma_i}, \pi = 1, n\} \in CH_{\pi}^{AL},$$

где f_{CS} – оператор контроля состояния ГТС; u_{γ_i} – вектор состояния объекта γ_i ; $r_{\gamma_i}^p(t_s)$ – регулирующее воздействие в момент времени t_s , удерживающее объект γ_i в области допустимой надежности средствами P .

Выражение (34) говорит о том, что для любого объекта γ_i из множества $(Ts \cup To \cup Tc)$, который находится в поле действия операторов ГТС (оператора изменения состояний f_M , оператора регулирования состояний f_R , оператора планирования изменения состояний f_{Π} , оператора контроля состояний f_{CS} , оператора классификации состояний f_{Ψ}^d), существует оператор управления объектом γ_i , который удерживает характеристики объекта γ_i в области допустимой надежности при помощи регулирующих воздействий $r_{\gamma_i}^E(t)$. Поясним выполнение второго целевого ориентира ГТС на примере работы системы управления эксплуатационным состоянием городской УДС.



Рис. 6. Участок городской УДС с элементами СУ ГТС

Пример 3. На участке № 1 четырехполосной автомобильной дороги группы А протяженностью 70 м и шириной 15 м СУ ГТС зарегистрировала следующие характеристики: повреждения покрытия общей площадью $S = 36 \text{ м}^2$; уровень яркости и освещенности, соответственно $L = 0,2 \text{ кл/м}^2$ и $E = 1,2 \text{ Лм}$ от систем дорожного освещения Л1 и Л2 на площади 450 м^2 (рис. 6). Техническое обслуживание участка УДС № 1 осуществляет организация ООО ДЭС-1. Необходимо определить регулирующее воздействие, которое окажет СУ ГТС для того, чтобы восстановить работоспособность участка городской УДС.

Решение. Элементы СУ ГТС регистрируют повреждения дорожного покрытия, превышающие допустимые нормы в 24 раза ($36/1,5 = 24$), а снижение требуемого уровня освещенности – в 8 раз ($1,6/0,2 = 8$).

Регулирующим воздействием СУ ГТС будет выдача предписания дорожно-эксплу-

атационной службе о необходимости:

проведения срочных ремонтных работ на участке № 1 по восстановлению должного уровня яркости до $1,6 \text{ кл/м}^2$ и освещенности до 20 Лм ;

восстановления дорожного покрытия с требуемыми нормативами – не более $1,5 \text{ м}^2$ повреждений на 1000 м^2 ;

выдачи предупредительных предписаний участникам транспортного процесса.

Формальная запись предписаний показана на рис. 7.

Таким образом, выполнение второго целевого ориентира СУ ГТС позволяет удерживать объекты ГТС в состоянии требуемой надежности и оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций.

Модели управления городскими транспортными потоками, построенные на основе целевой функции управления (целевые ориентиры пользователя и ГТС), отражают принцип рациональной самоорганизации.

$$\begin{aligned}
 U_{[\text{участок } \#1]} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{яркость } L=0,02 \text{ кл/м}^2 \\ \text{освещенность } E=1,2 \text{ Лк} \\ \text{ПДП } S=36 \text{ м}^2 \text{ на } 1000 \text{ м}^2 \end{array} \right\} \xrightarrow{r_{[\text{ООО ДЭС-1}]}^{[\text{участок } \#1]}(t_{\text{отпр}})} \left\{ \begin{array}{l} L=1,6 \text{ кл/м}^2 \\ E=20 \text{ Лк} \\ S=0,3 \text{ м}^2 \text{ на } 1000 \text{ м}^2 \end{array} \right\} \\
 r_{[\text{участок } \#1]}^{[\text{ООО ДЭС-1}]}(t_{\text{отпр}}) &= \left[\begin{array}{l} L=0,02 \text{ кл/м}^2 \xrightarrow{\uparrow} L=1,6 \text{ кл/м}^2 \\ E=1,2 \text{ Лк} \xrightarrow{\uparrow} E=20 \text{ Лк} \end{array} \right] \xrightarrow{\text{ремонт } \rightarrow \text{Л1, Л2}} \left[\begin{array}{l} S=36 \text{ м}^2 \xrightarrow{\downarrow} S=0,3 \text{ м}^2 \end{array} \right] \wedge \left[\begin{array}{l} T=5 \text{ сут} \end{array} \right] \\
 r_{[\text{участок } \#1]}^{[\text{Участники ТП}]}(t_{\text{отпр}}) &= \left[\begin{array}{l} \text{Внимание: на участке } \#1 \text{ нарушена освещенность } \rightarrow L=0,02 \text{ кл/м}^2 \\ E=1,2 \text{ Лк} \\ \text{Внимание: на участке } \#1 \text{ повреждено дорожное покрытие } \rightarrow S=36 \text{ м}^2 \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Рис. 7. Формальная запись предписаний

\uparrow, \downarrow – снизить и увеличить; \rightarrow – знак импликации; \wedge – знак конъюнкции

Информационное наполнение моделей может осуществляться на основе достоверной информации, поступающей с системы городского транспортно-логистического мониторинга. Функциональная структура моделей позволяет учитывать динамические состояния и параметры подвижных и стационарных транспортных объектов.

Внедрение предложенных моделей на принципах [21] способно повысить пропускную способность транспортной системы мегаполиса [22] за счет устранения нерационального распределения ТП, а также надежность [23] и управляемость – за счет информирования участников транспортного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European Union and IRU. A Scientific Study European Truck Accident Causation. The International Road Transport Union. 2007. P. 19 [электронный ресурс]/ URL: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/
2. **Кривова В.Д.** Аналитический доклад. К IV междунар. конгрессу Безопасность на дорогах ради безопасности жизни // Аналитический вестник. 2012. № 26(469). 150 с. [электронный ресурс]/ URL: http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26_469/VSF_NEW_26_469.pdf
3. **Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.** Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 360 с.
4. **Семенов В.В.** Математические методы моделирования транспортных потоков // Новое в синергетике. Новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука, 2007. С. 102–133.
5. **Семенов В.В.** Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. М.: ИПМ РАН, 2004. 44 с.
6. **Семенов В.В.** Смена парадигмы в теории транспортных потоков. М.: ИПМ РАН, 2006. 32 с.
7. **Смирнов Н.Н., Киселев А.Б., Никитин В.Ф., Юмашев М.В.** Математическое моделирование автомобильных потоков на магистралях // Вестник Московского университета. Математика и механика. 2000. № 4. С. 39–44.
8. **Швецов В.И.** Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
9. **Крылатов А.Ю.** Оптимальные стратегии управления транспортными потоками на сети из параллельных каналов // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. № 2. С. 121–130.
10. **Селиверстов Я.А.** Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 1. С.43–49.
11. **Захаров В.В., Крылатов А.Ю.** Системное равновесие транспортных потоков в мегаполисе и стратегии навигаторов: теоретико-игровой подход // Математическая теория игр и ее приложения. 2012. Т. 4. № 4. С. 23–44.
12. **Гасников А.В., Дорн Ю.В., Нестеров Ю.Е., Шпирко С.В.** О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков // Математическое моделирование. 2014. № 6 (26). С. 34–70.
13. **Султанахмедов М.А.** Управление городскими пассажиропотоками на основе графовых моделей // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 55–60.
14. **Белый О.В., Малыгин И.Г., Цыганов В.В., Еналеев А.К., Савушкин С.А.** Математические модели оптимизации структуры системы управления крупномасштабной транспортной корпорации // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 1. С. 7–16.
15. **Селиверстов С.А.** Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 2 (24). С. 92–100.
16. **Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А.** О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 4(200). С. 57–68.
17. **Селиверстов Я.А.** О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // Наукосведение. 2014. № 5(24) [электронный ресурс]/ URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>
18. **Lohse D.** Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice// Working Paper. Dresden: Technical University of Dresden, 2004. Pp. 1–15.
19. **Лозе Д.** Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для лично-

го и служебного автотранспорта. Обзор теорий моделирования. Дрезден: Дрезденский технический ун-т, 2007. 15 с.

20. **Седжвик Р.** Фундаментальные алгоритмы на C++. Алгоритмы на графах. Пер. с англ. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. 496 с.

21. **Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А.** Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Науковедение*. 2014. № 3(22). С. 1–33. [электронный ресурс]/ URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN314.pdf>

PDF/74TVN314.pdf

22. **Селиверстов Я.А.** Основы теории субъ-ективных функциональных возможностей рационального выбора // *Науковедение*. 2014. № 4(23). С. 1–39. [электронный ресурс]/ URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN414.pdf>

23. **Куватов В.И., Шаталова Н.В., Онов В.А.** Пути ускорения перевозок и повышения безопасности автомобильного транспорта // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2013. № 2 (26). С. 26–33.

REFERENCES

1. *European Union and IRU. A Scientific Study European Truck Accident Causation*, The International Road Transport Union, 2007, P. 19. Available: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/

2. **Krivova V.D.** Analiticheskiy doklad. K IV mezhdunarodnomu kongressu Bezopasnost na dorogah radi bezopasnosti zhizni, *Analiticheskiy vestnik*, 2012, No. 26(469), 150 p. Available: http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26_469/VSF_NEW_26_469.pdf

3. **Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskiy Ye.A., Kholodov Ya.A., Shamray N.B.** *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov*. Moscow: MFTI Publ., 2010, 360 p. (rus)

4. **Semenov V.V.** Matematicheskiye metody modelirovaniya transportnykh potokov, *Novoye v sinergetike. Novaya realnost, novyye problemy, novoye pokoleniye*. Moscow: Nauka Publ., 2007, Pp. 102–133. (rus)

5. **Semenov V.V.** *Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki transportnykh potokov megapolisa*. Moscow: IPM RAN Publ., 2004, 44 p. (rus)

6. **Semenov V.V.** *Smena paradigmy v teorii transportnykh potokov*. Moscow: IPM RAN Publ., 2006, 32 p. (rus)

7. **Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Yumashev M.V.** Matematicheskoye modelirovaniye avtomobilnykh potokov na magistralyakh, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2000, No. 4, Pp. 39–44. (rus)

8. **Shvetsov V.I.** Matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov, *Avtomatika i telemekhanika*, 2003, No. 11, Pp. 3–46. (rus)

9. **Krylatov A.Yu.** Optimalnyye strategii upravleniya transportnymi potokami na seti iz parallelnykh kanalov, *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessyi upravleniya*, 2014, No. 2, Pp. 121–130. (rus)

10. **Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh, *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)

11. **Zakharov V.V., Krylatov A.Yu.** Sistemnoye ravnovesiye transportnykh potokov v megapolise i strategii navigatorov: teoretiko-igrovoy podkhod, *Matematicheskaya teoriya igr i yeye prilozheniya*, 2012, Vol. 4, No. 4, Pp. 23–44. (rus)

12. **Gasnikov A.V., Dorn Yu.V., Nesterov Yu.Ye., Shpirko S.V.** O trekhstadiynoy versii modeli statsionarnoy dinamiki transportnykh potokov, *Matematicheskoe modelirovanie*, 2014, No. 6(26), Pp. 34–70. (rus)

13. **Sultanakhmedov M.A.** Upravleniye gorodskimi passazhiropotokami na osnove grafovyykh modeley, *Vestnik AGTU. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2010, No. 2, Pp. 55–60. (rus)

14. **Belyy O.V., Malygin I.G., Tsyganov V.V., Yenaleyev A.K., Savushkin S.A.** Matematicheskiye modeli optimizatsii struktury sistemy upravleniya krupnomasshtabnoy transportnoy korporatsii, *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye*. 2014, No. 1, Pp. 7–16. (rus)

15. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2014, No. 2 (24), Pp. 92–100. (rus)

16. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsessa. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

17. **Seliverstov Ya.A.** O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentnykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa, *Naukovedeniye*, 2014, No. 5(24), Pp. 1–39. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>

18. **Lohse D.** Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice, *Working Paper*. Dresden: Technical University of

Dresden, 2004, Pp. 1–15.

19. **Loze D.** *Modelirovaniye transportnogo predlozheniya i sprosa na transport dlya lichnogo i sluzhebnoy avtotransporta. Obzor teory modelirovaniya.* Drezden: Drezdenskiy Tekhnicheskiy Universitet, 2007, 15 p. (rus)

20. **Sedzhvik R.** *Fundamentalnyye algoritmy na S++.* *Algoritmy na grafakh.* St. Petersburg: ООО «DiaSoftYuP» Publ., 2002, 496 p. (rus)

21. **Seliverstov C.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktного nepreryvnogo transportnogo protsessa dvizheniya, *Naukovedeniye*, 2014,

No. 3(22), Pp. 1–33. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN314.pdf>

22. **Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora, *Naukovedeniye*, 2014, No. 4(23), Pp. 1–39. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN414.pdf>

23. **Kuvatov V.I., Shatalova N.V., Onov V.A.** Puti uskoreniya perevozok i povysheniya bezopasnosti avtomobilnogo transporta, *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2013, No. 2 (26), Pp. 26–33. (rus)

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

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

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

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

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

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

СТАРИЧЕНКОВ Алексей Леонидович – заведующий лабораторией проблем безопасности транспортных систем Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН, доктор технических наук.

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

E-mail: allstar72@mail.ru

STARICHENKOV, Aleksey L. *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences.*

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

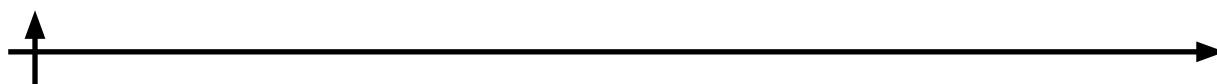
E-mail: allstar72@mail.ru



АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аверина А.А.	2(193) 143-152	Гритцбург Т.	5(205) 21-34
Агеев Е.В.	2(193) 9-22	Демидова Л.А.	3(198) 37-48
Акулов Д.В.	1(188) 76-82	Доросинский Л.Г.	4(200) 79-87
Акульшин Ю.Д.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Дробинцев П.Д.	3(198) 85-91; 92-98
Ампилова Н.Б.	1(188) 51-61	Езангина Т.А.	4(200) 88-94
Антонов Н.А.	2(193) 143-152	Ермаков А.В.	6(210) 16-23
Арсеньев Д.Г.	5(205) 100-107	Ефремова О.А.	4(200) 7-16
Бабенко М.Г.	3(198) 65-77	Жиленков А.А.	3(198) 28-36
Балашов Е.В.	1(188) 37-44	Завьялов С.В.	2(193) 45-54
Бельски А.	5(205) 21-34	Закирова И.И.	3(198) 92-98
Беляев С.Ю.	2(193) 23-30; 5(205) 63-71	Зверев А.В.	2(193) 153-168
Бендерская Е.Н.	1(188) 9-16; 2(193) 9-22	Зобнин С.С.	1(188) 23-30
Бородин А.А.	3(198) 19-27	Иванников В.П.	2(193) 130-142
Бортяков Д.Е.	1(188) 105-113	Иванов А.С.	4(200) 41-46
Ботнев В.А.	3(198) 49-58	Иванов В.М.	5(205) 82-92
Булда А.Ю.	2(193) 153-168	Иванов Н.В.	1(188) 45-50
Бурдаков С.Ф.	6(210) 49-58	Ившина Ю.В.	4(200) 95-105
Буянова О.А.	2(193) 153-168	Игумнов А.В.	2(193) 99-109
Валов П.М.	1(188) 83-90	Иткин И.Л.	2(193) 143-152
Варгаузин В.А.	2(193) 39-44	Ицыксон В.М.	2(193) 129
Васильева А.В.	1(188) 83-90	Казакин А.Н.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62
Веселов А.О.	3(198) 78-84	Кайзер М.	5(205) 21-34
Винке А.	5(205) 21-34	Камкин А.С.	2(193) 130-142
Воинов Н.В.	3(198) 85-91	Касимов В.А.	2(193) 61-73; 74-84
Воробьев С.И.	1(188) 31-36	Козлов В.П.	5(205) 53-62
Вюрц М.	5(205) 21-34	Комаревцев И.М.	5(205) 43-52; 53-62
Гайворонский С.А.	4(200) 88-94	Конищев М.А.	1(188) 76-82
Гаранина Н.О.	1(188) 69-75	Корнага Я.И.	2(193) 31-38
Глазунов В.В.	4(200) 29-40	Коротков А.С.	1(188) 37-44; 45-50
Глуховской А.В.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Коршунов А.В.	5(205) 53-62
Грисбах Т.	5(205) 21-34		

Котенко И.В.	3(198) 7-18	Пакулин Н.В.	2(193) 180-188; 189-203
Котляров В.П.	3(198) 78-84; 85-91; 4(200) 41-46	Подымов В.В.	2(193) 169-179
Котов В.В.	5(205) 100-107	Полетаев И.Г.	1(188) 76-82
Круглов В.Н.	4(200) 79-87	Поляков В.Б.	1(188) 23-30
Кузнецов А.Н.	2(193) 110-125	Полянский В.А.	5(205) 100-107
Курочкин М.А.	4(200) 29-40	Попеско У.В.	2(193) 169-179
Лавриненко И.Н.	3(198) 65-77	Попов С.О.	4(200) 17-28
Лаптев В.В.	5(205) 82-92	Потехин В.В.	1(188) 17-22; 31-36; 76-82; 83-90
Логоинов А.Л.	1(188) 76-82	Пышкин Е.В.	2(193) 110-125
Лукин А.А.	6(210) 24-32	Пятышев Е.Н.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62
Лурье М.С.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Райчук Д.Ю.	6(210) 7-15; 24-32
Лягин А.М.	3(198) 65-77	Риссинг Л.	5(205) 21-34
Ляхов П.А.	3(198) 65-77	Рогов П.А.	6(210) 33-42
Макаров С.Б.	2(193) 45-54	Ростов Н.В.	2(193) 91-98; 5(205) 93-99; 6(210) 59-66
Мальшев В.М.	2(193) 55-60	Рудометов С.В.	1(188) 62-68
Марков В.Н.	6(210) 43-48	Рыбин Ю.К.	2(193) 85-90
Марценюк М.А.	6(210) 67-80	Саенко И.Б.	3(198) 7-18
Матвеев Ю.А.	2(193) 55-60	Самочадин А.В.	4(200) 17-28; 6(210) 7-15; 24-32; 33-42
Мешеряков С.В.	1(188) 91-98; 99-104; 105-113	Самочадина Т.Н.	4(200) 17-28
Минуллин Р.Г.	2(193) 61-73; 74-84	Сараджишвили С.Э.	2(193) 99-109
Мухин В.Е.	2(193) 31-38	Селетков И.П.	6(210) 67-80
Нестеров Н.И.	3(198) 37-48	Селиверстов С.А.	4(200) 57-68
Никешин А.В.	2(193) 180-188	Селиверстов Я.А.	4(200) 57-68; 6(210) 81-94
Никитин А.Б.	2(193) 55-60	Семенов С.Н.	1(188) 31-36
Никифоров И.В.	3(198) 85-91	Сизов П.А.	6(210) 49-58
Николаев С.Г.	4(200) 95-105	Соколова А.В.	4(200) 7-16
Носницын С.М.	6(210) 7-15		
Окольнишников В.В.	1(188) 62-68		
Орлов П.А.	5(205) 82-92		
Осенняя Д.И.	3(198) 92-98		
Павлов С.В.	4(200) 7-16		

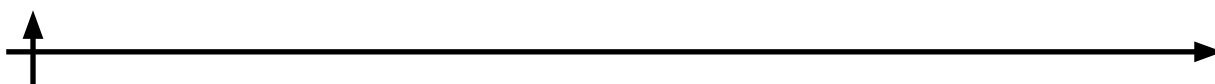


Соловьев И.П.	1(188) 51-61	Хуршудов А.А.	5(205) 72-81;
Стариченков А.Л.	6(210) 81-94		6(210) 43-48
Стешин В.В.	2(193) 31-38	Червяков Н.И.	3(198) 65-77
Сужаев О.И.	6(210) 33-42	Черноручский И.Г.	4(200) 47-56;
Тиме Т.	5(205) 8-20		69-78
Тимофеев Д.А.	4(200) 17-28;	Черный С.Г.	3(198) 28-36
	6(210) 24-32;	Четвериков С.Ф.	3(198) 59-64
	33-42	Чирышев Ю.В.	4(200) 79-87
Тишкин Р.В.	3(198) 37-48	Чупилко М.М.	2(193) 130-142
Тыжненко Д.А.	1(188) 83-90	Шнитман В.З.	2(193) 180-188
Тютин Б.В.	3(198) 78-84	Шубников В.Г.	2(193) 23-30;
Устинов С.М.	3(198) 49-58		5(205) 63-71
Федоров А.В.	1(188) 17-22	Шуплецов Ю.В.	1(188) 51-61
Филимонова Т.К.	2(193) 61-73;	Шемелинин Д.А.	1(188) 91-98;
	74-84		99-104; 105-113
Хмельков И.А.	6(210) 7-15;	Юсупов Р.М.	3(198) 7-18
	24-32	Яруллин М.Р.	2(193) 61-73;
Худяков А.В.	2(193) 55-60		74-84

AUTHOR INDEX

Ageev E.V.	2(193) 9-22	Botnev V.A.	3(198) 49-58
Akulov D.V.	1(188) 76-82	Bulda A.Yu.	2(193) 153-168
Akulshin Yu.D.	5(205) 35-42;	Burdakov S.F.	6(210) 49-58
	43-52; 53-62	Buyanova O.A.	2(193) 153-168
Ampilova N.B.	1(188) 51-61	Chernorutskiy I.G.	4(200) 47-56;
Antonov N.A.	2(193) 143-152		69-78
Arseniev D.G.	5(205) 100-107	Cherny S.G.	3(198) 28-36
Averina A.A.	2(193) 143-152	Chervyakov N.I.	3(198) 65-77
Babenko M.Gr.	3(198) 65-77	Chetverikov S.F.	3(198) 59-64
Balashov E.V.	1(188) 37-44	Chiryshv Yu.V.	4(200) 79-87
Belski A.	5(205) 21-34	Chupilko M.M.	2(193) 130-142
Belyaev S.Yu.	2(193) 23-30;	Creutzburg T.	5(205) 21-34
	63-71	Demidova L.A.	3(198) 37-48
Benderskaya E.N.	1(188) 9-16;	Dorosinsky L.G.	4(200) 79-87
	2(193) 9-22	Drobintsev P.D.	3(198) 85-91;
Borodin A.A.	3(198) 19-27		92-98
Bortyakov D.E.	1(188) 105-113	Efremova O.A.	4(200) 7-16

Ermakov A.V.	6(210) 16-23	Kotenko I.V.	3(198) 7-18
Ezangina T.A.	4(200) 88-94	Kotlyarov V.P.	3(198) 78-84; 85-91;
Fedorov A.V.	1(188) 17-22		4(200) 41-46
Filimonova T.K.	2(193) 61-73; 74-84	Kotov V.V.	5(205) 100-107
Garanina N.O.	1(188) 69-75	Kozlov V.P.	5(205) 53-62
Gayvoronskiy S.A.	4(200) 88-94	Krouglov V.N.	4(200) 79-87
Glazunov V.V.	4(200) 29-40	Kurochkin M.A.	4(200) 29-40
Gluhovskoi A.V.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Kuznetsov A.N.	2(193) 110-125
Griesbach T.	5(205) 21-34	Laptev V.V.	5(205) 82-92
Igumnov A.V.	2(193) 99-109	Lavrinenko I.N.	3(198) 65-77
Itkin I.L.	2(193) 143-152	Loginov A.L.	1(188) 76-82
Itsykson V.M.	2(193) 129	Lukin A.A.	6(210) 24-32
Ivannikov V.P.	2(193) 130-142	Lurie M.S.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62
Ivanov A.S.	4(200) 41-46	Lyagin A.M.	3(198) 65-77
Ivanov N.V.	1(188) 45-50	Lyakhov P.A.	3(198) 65-77
Ivanov V.M.	5(205) 82-92	Makarov S.B.	2(193) 45-54
Ivshina Yu.V.	4(200) 95-105	Malyshev V.M.	2(193) 55-60
Kaiser M.	5(205) 21-34	Markov V.N.	6(210) 45-54
Kamkin A.S.	2(193) 130-142	Martsenyuk M.A.	6(210) 67-80
Kasimov V.A.	2(193) 61-73; 74-84	Matveev Yu.A.	2(193) 55-60
Kazakin A.N.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Mescheryakov S.V.	1(188) 91-98; 99-104; 105-113
Khmelkov I.A.	6(210) 7-15; 24-32	Minullin R.G.	2(193) 61-73; 74-84
Khudyakov A.V.	2(193) 55-60	Mukhin V.Ye.	2(193) 31-38
Khurshudov A.A.	5(205) 72-81; 6(210) 43-48	Nesterov N.I.	3(198) 37-48
Komarevtcev I.M.	5(205) 43-52; 53-62	Nikeshin A.V.	2(193) 180-188
Konishchev M.A.	1(188) 76-82	Nikiforov I.V.	3(198) 85-91
Kornaga Ya.I.	2(193) 31-38	Nikitin A.B.	2(193) 55-60
Korotkov A.S.	1(188) 37-44; 45-50	Nikolaev S.G.	4(200) 95-105
Korshunov A.V.	5(205) 53-62	Nosnitsyn S.M.	6(210) 7-15
		Okolnishnikov V.V.	1(188) 62-68
		Orlov P.A.	5(205) 82-92
		Osennya D.I.	3(198) 92-98
		Pakulin N.V.	2(193) 180-188; 189-203



Pavlov S.V.	4(200) 7-16	Shnitman V.Z.	2(193) 180-188
Piatyshev E.N.	5(205) 35-42; 43-52; 53-62	Shubnikov V.G.	2(193) 23-30; 5(205) 63-71
Podymov V.V.	2(193) 169-179	Shupletsov Yu.V.	1(188) 51-61
Poletaev I.G.	1(188) 76-82	Sizov P.A.	6(210) 49-58
Polyakov V.B.	1(188) 23-30	Sokolova A.V.	4(200) 7-16
Polyanskiy V.A.	5(205) 100-107	Soloviev I.P.	1(188) 51-61
Popesko U.V.	2(193) 169-179	Starichenkov A.L.	6(210) 81-94
Popov S.O.	4(200) 17-28	Steshyn V.V.	2(193) 31-38
Potekhin V.V.	1(188) 17-22; 31-36; 76-82; 83-90	Suzhaev O.I.	6(210) 33-42
Pyshkin E.V.	2(193) 110-125	Thieme T.	5(205) 8-20
Raychuk D.Yu.	6(210) 7-15; 24-32	Timofeev D.A.	4(200) 17-28; 6(210) 24-32; 33-42
Rissing L.	5(205) 21-34	Tishkin R.V.	3(198) 37-48
Rogov P.A.	6(210) 33-42	Tiutin B.V.	3(198) 78-84
Rostov N.V.	2(193) 91-98; 5(205) 93-99; 6(210) 59-66	Tyzhnenko D.A.	1(188) 83-90
Rudometov S.V.	1(188) 62-68	Ustinov S.M.	3(198) 49-58
Rybin Yu.K.	2(193) 85-90	Valov P.M.	1(188) 83-90
Saenko I.B.	3(198) 7-18	Vargauzin V.A.	2(193) 39-44
Samochadin A.V.	4(200) 17-28; 6(210) 7-15; 24-32; 33-42	Vasilyeva A.V.	1(188) 83-90
Samochadina T.N.	4(200) 17-28	Veselov A.O.	3(198) 78-84
Saradgishvili S.E.	2(193) 99-109	Voinov N.V.	3(198) 85-91
Seletkov I.P.	6(210) 67-80	Vorobyev S.I.	1(188) 31-36
Seliverstov S.A.	4(200) 57-68	Wienecke A.	5(205) 21-34
Seliverstov Ya.A.	4(200) 57-68; 6(210) 81-94	Wurz M.	5(205) 21-34
Semenov S.N.	1(188) 31-36	Yarullin M.R.	2(193) 61-73; 74-84
Shchemelinin D.A.	1(188) 91-98; 99-104; 105-113	Yusupov R.M.	3(198) 7-18
		Zakirova I.I.	3(198) 92-98
		Zavyalov S.V.	2(193) 45-54
		Zhilentov A.A.	3(198) 28-36
		Zobnin S.S.	1(188) 23-30
		Zverev A.V.	2(193) 153-168

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 (210) 2014

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

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

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 29.12.2014. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 11,86. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

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

Периодичность выхода журнала – 6 номеров в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – **TNR**, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru