



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

2(217) – 3(222) 2015

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 политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

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

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

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

Карнов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

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

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

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

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

Шкодыврев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 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.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



**ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL**

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

2(217) – 3(222) 2015

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2015

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*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsyson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic 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*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic 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*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

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

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic 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

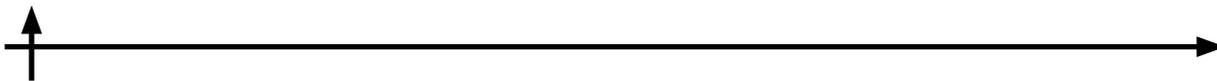
© Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

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.

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015



ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА РОССИЙСКИХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ ПО ВЕРСИИ НИУ-ВШЭ



8 апреля 2015 года, в рамках XVI апрельской конференции, в Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики» (НИУ-ВШЭ) состоялся круглый стол, на котором были представлены методики и результаты проекта по ранжированию российских научных журналов, проводимые университетом в течение года. Авторы так сформулировали основную цель проекта: если при оценке научного уровня небольших научных коллективов используются известные системы экспертизы, то как измерить результаты академической деятельности, которая производится в больших, «промышленных» масштабах? На этот вопрос и призван был

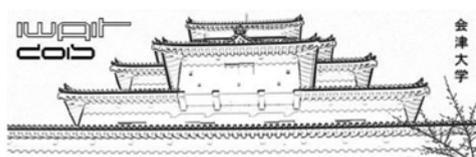
ответить проект по экспертной оценке российских научных журналов. Учитывая, что количественные оценки деятельности ученых стали частью государственной политики и стратегий развития университетов, результаты проекта по ранжированию журналов носят выраженный прикладной характер и будут являться своего рода инструментом оценки деятельности специалистов. Кроме того, предполагаемые к опубликованию данные продемонстрируют авторам, где следует публиковаться и к сотрудничеству с какими журналами следует стремиться.

К участию в проекте были привлечены более 600 экспертов как из России, так и из более чем 15 стран мира. Их имена НИУ-ВШЭ не разглашает. Эксперты, представлявшие ведущие научные школы и основные направления исследований, заполнили более 10 000 анкет по 13 направлениям науки: математике, прикладной математике, информатике, истории, праву, социологии, менеджменту, экономике, филологии, лингвистике, философии, политологии и психологии. Заметим, что, к сожалению, не рассматривались физические и научно-технические журналы по отличным от информатики направлениям. После обработки анкет прошло разделение изданий на группы. По терминологии авторов проекта, журналы были разделены на три группы: «очень хорошие» А1, «хорошие» А2, «нормальные» В. По направлению «Информатика» в состав рейтинговых журналов включен журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление» («НТВ СПбГПУ. ИТУ»).

Всего эксперты рассмотрели более ста отечественных изданий по информатике. В группу А1 ни один из российских журналов не вошел, в группу А2 эксперты включили один журнал — «Программирование» (издание РАН), в группу В — 14 журналов. «НТВ СПбГПУ. ИТУ» вошел в данную группу наряду с профильными «Вестниками» Московского и Санкт-Петербургского университетов, «Известиями РАН по теории и системам управления», «Трудами» ведущих академических институтов — СПИИ и ИСП.

Редколлегия журнала поздравляет сотрудников редакции, рецензентов, авторов статей и творческие коллективы, работа которых способствовала развитию и известным успехам журнала!

А.С. Коротков,
главный редактор «НТВ СПбГПУ. ИТУ»



International Workshop on Applications in Information Technology (IWAIT-2015)

<http://kspt.icc.spbstu.ru/conf/iwait-2015/>

October 8-10, 2015, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan



**The University of Aizu
St. Petersburg State University
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

MISSION STATEMENT The main objective of this workshop is to foster rich creativity in students' research works and to encourage students to participate actively in open discussions with their colleagues. This event is a place for the first scientific presentations of the best students of the universities participating in this project. This workshop creates the necessary conditions to keep international scientific contacts at the student level. We do hope that some of students participating in this workshop will tightly collaborate in their future projects.



CALL FOR PAPERS The 2015 International Workshop on Applications in Information Technology invites student papers presenting new advances and research results in the fields of information technology applications. The workshops will bring together under-graduate, graduate, master and Ph.D. students, academic scientists, researchers and scholars in the domains which include, but are not limited to:

- Applications for Mobile Devices
- Computer Systems and Architectures
- Web Technology
- Control Systems
- Cloud computing
- Human-Centric Computing
- Information Retrieval and Data Mining
- Information Technology
- Intelligent Systems
- Knowledge Engineering
- Machine Learning
- Machine Vision and Pattern Recognition
- Modeling and Simulation
- Software Design and Engineering
- Visualization
- Computer Assisted Learning Environments and Applications

IMPORTANT DATES July 19, 2015

Paper submission

August 1, 2015

Notification of acceptance/rejection

September 13, 2015

Final version of paper submission

October 8-10, 2015

Workshop



INFORMATION SPONSOR St. Petersburg State Polytechnic University Journal.
Computer Science, Telecommunication and Control Systems



Содержание

Информационные технологии

Эль-Хатиб С.А., Скобцов Ю.А. Система сегментации медицинских снимков методом муравьиных колоний	9
--	---

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Глазунов В.В., Курочкин М.А., Попов С.Г., Ву Чунминг, Лиу Леибо Технология управления облачным сервисом телематической карты интеллектуальной транспортной системы.....	19
Лабошин Л.Ю., Лукашин А.А., Заборовский В.С. Применение технологии MapReduce для контроля доступа к информационным ресурсам в корпоративных сетях.....	34

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Ильин А.С. Алгоритм интерполяции возрастающей функции экспоненциальными сплайнами	41
Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций.....	49
Акишин А.А., Савоськин А.Н. Генерация многомерного случайного процесса возмущений в задачах динамики подвижного состава железных дорог.....	71

Системный анализ и управление

Чуркин В.В. Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования.....	79
Козионов А.П., Пяйт А.Л., Мохов И.И., Иванов Ю.П. Исследование алгоритмов восстановления пропусков в измеряемых сигналах для системы мониторинга состояния дамб	93
Хуршудов А.А. Представление трехмерных объектов с помощью ансамбля трансформирующих автоассоциаторов.....	105

Интеллектуальные системы и технологии

Хуршудов А.А. Построение трехмерных карт признаков на основе видеофрагментов методом оптического потока.....	115
Марценюк М.А., Селетков И.П. Нечеткий клеточный автомат для регулирования поля температуры	125
Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О построении интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса.....	139

Contents

Information Technologies

El-Khatib S.A., Skobtcov Yu.A. <i>System of Medical Image Segmentation Using Ant Colony Optimization..</i>	9
---	---

Telecommunications Systems and Computer Networks

Glazunov V.V., Kurochkin M.A., Popov S.G., Wu Chunming, Liu Leibo <i>Management Technology for the Cloud Service of the Telematics Map in the Intelligent Transportation System.....</i>	19
Laboshin L.Yu., Lukashin A.A., Zaborovsky V.S. <i>Applying Mapreduce and Network Traffic Analysis to Control Access to Information Resources</i>	34

Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

Ilyin A.S. <i>Interpolation Algorithm for an Increasing Function by Exponential Splines</i>	41
Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. <i>Methods and Models of the Construction of Transport Correspondence Matrix.....</i>	49
Akishin A.A., Savoskin A.N. <i>Generating a Multidimensional Perturbed Stochastic Process in Railways Rolling Stock Dynamics.....</i>	71

System Analysis and Control

Churkin V.V. <i>Estimation and Optimization of Spare Parts Kit Using the Method of Statistical Modeling</i>	79
Kozionov A.P., Pyayt A.L., Mokhov I.I., Ivanov Yu.P. <i>Research on Gap-filling Algorithms for Dike Health Monitoring Systems</i>	93
Khurshudov A.A. <i>Using an Ensemble of Transforming Autoencoders to Represent 3D Objects.....</i>	105

Intellectual Systems and Technologies

Khurshudov A.A. <i>Constructing 3D Feature Maps from Video Sequences by Optic Flow Estimation</i>	115
Martsenyuk M.A., Seletkov I.P. <i>Fuzzy Cellular Automata for Temperature Field Control.....</i>	125
Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A. <i>Construction of Intelligent System for the Organization and Development of Transport System Metropolis.....</i>	139

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.1

УДК 004.932

С.А. Эль-Хатиб, Ю.А. Скобцов

СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ СНИМКОВ МЕТОДОМ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

S.A. El-Khatib, Yu.A. Skobtsov

SYSTEM OF MEDICAL IMAGE SEGMENTATION USING ANT COLONY OPTIMIZATION

Представлена система обработки изображений с помощью комбинированного алгоритма муравьиных колоний и К-средних. Выполнена реализация возможности работы непосредственно с «сырыми» медицинскими снимками и интеграция в алгоритм сегментации К-средних и муравьиных колоний. Выполнен анализ и реализация смешанного алгоритма сегментации К-средних и муравьиных колоний, а также реализована программная система для визуализации и тестирования разработанного алгоритма. Тестирование алгоритма проведено на наборах данных из системы Ossiriss. Выполнено сравнение разработанного метода с алгоритмами автоматической (метод C-means) и интерактивной (алгоритм Magic Wand) сегментаций. Представлены выходные изображения и значения эвристических коэффициентов разработанного алгоритма.

СЕГМЕНТАЦИЯ; АЛГОРИТМ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ; АЛГОРИТМ К-СРЕДНИХ; АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ; МЕДИЦИНСКАЯ СИСТЕМА.

The article presents an image-processing system using a combined ant colony optimization algorithm and K-means. We have developed the possibility of working directly with «raw» medical images and integration into the segmentation algorithm of K-Means and ant colonies. We have implemented and analyzed a mixed segmentation algorithm of K-means and ant colony optimization. The software system has been implemented to visualize and test the developed algorithm. We have tested the algorithm using data from the Ossiriss system. We have also compared the obtained data of the developed method with automatic algorithms (C-Means) and interactive methods (the algorithm Magic Wand). The article shows the output images and values of heuristic coefficients of the algorithm.

SEGMENTATION; ANT COLONY OPTIMIZATION; K-MEANS ALGORITHM; IMAGE ANALYSIS; MEDICAL SYSTEM.

Одна из самых сложных задач при анализе изображений — сегментация. Все последующие шаги в анализе изображений, такие как классификация, распознавание и выделение образов, напрямую зависят от результатов сегментации. Сегментация является предметом исследований большого количества ученых и исследователей. Существует большое количество методов сегментации, с которыми можно ознакомиться, например в [1].

Наибольшую сложность при сегментации представляет учет различных дополнительных факторов: вариабельности фона, наличия шума, различий между частями изображения. Методы сегментации делятся на два класса:

автоматические [2] (ввод дополнительной информации от пользователя не требуется);

интерактивные [3] (в процессе работы требуется уточнение информации от пользователя).

Методы первой группы узкоспециализированные и чаще используются в задачах машинного зрения (например, поиск объектов на изображении и т. д.). Методы второй группы накладывают ограничение на разбиение (например, по цвету или текстуре). Методы данной группы в основном используются на начальных этапах обработки изображений для последующего представления их в удобном виде.

Весьма интересные результаты при обработке изображений показывают методы искусственного интеллекта, такие как генетические алгоритмы [9] и нейронные сети [10].

Алгоритм муравьиных колоний (Ant Colony Optimization – ACO) – один из самых новейших подходов в современном искусственном интеллекте. Данный алгоритм, основанный на природной модели поведения муравьев, используется прежде всего для решения задач оптимизации. В этом алгоритме решение поэтапно выстраивается при помощи стохастического поиска, путем добавления частных решений в общее. Процесс построения решения выполняется каждым муравьем отдельно, используя эвристическую информацию в виде искусственного феромона, позволяющего отразить опыт, полученный при решении задачи на каждом шаге.

Большую популярность при сегментации получил алгоритм K-средних. Основа алгоритма – минимизация квадратичной ошибки. Алгоритм K-средних достаточно качественно выполняет кластеризацию пикселей изображения, но подвержен влиянию избыточной информации (например зашумленности изображения). Данный алгоритм выполняет построение K различных кластеров. Число кластеров выбирается на основании результатов исследований либо с помощью экспертной оценки. Идея алгоритма состоит в нахождении множества кластеров, средние значения в которых максимально отличались бы друг от друга. Приведем псевдокод алгоритма K-средних:

Begin

Init (randomly k centers of clusters);

Boolean clusterCentersHasChanged =

true;

Repeat

For $i=1$ to pixels_count **do begin**

AssignPixelToCluster();

End

Integer count = 0;

For $i=1$ to k **do begin**

CalculateNewClusterCenter();

If (**Compare**(newClusterCenter, oldClusterCenter) <> 0) **then**

count += 1;

end

End

clusterCentersHasChanged = (count > 0);

Until (clusterCentersHasChanged)

End

Оптимизация муравьиными колониями показала свою эффективность при решении NP-полных задач наряду с генетическими алгоритмами (GA) или алгоритмом имитации отжига (SA) [3].

Муравьиный алгоритм

Оптимизация методом муравьиной колонии или муравьиный алгоритм – метод оптимизации для решения задач на графах и задачи коммивояжера, в частности [7]. В основе алгоритма – моделирование поведения муравьев в социальной среде.

Муравьи являются социальными насекомыми, живущие в коллективе – колонии. В одной колонии могут проживать более миллиона особей, сама же колония может занимать территорию в десятки километров. В колонии отсутствует централизованное управление, а обмен информацией между особями происходит при помощи феромона, который муравьи оставляют при перемещении по территории. Чем больше муравьев проходит по определенному пути, тем выше концентрация феромона на нем. При выборе пути из нескольких возможных вариантов, муравей выбирает тот, на котором концентрация феромона больше. Таковы принципы жизнедеятельности колонии муравьев. Они и легли в основу одноименного алгоритма, впервые предложенного Marco Dorigo в 1992 г. для поиска путей на графах [4].

Основу алгоритма составляет реальное поведение муравьиной колонии – маркировка лучших путей большим количеством феромона. Первоначально муравьи размещены в вершинах графа, а далее начинается движение, направление которого определяется согласно формуле:

$$P_i = \frac{l_i^q * f_i^p}{\sum_{k=0}^N l_k^q * f_k^p}, \quad (1)$$

где P_i – вероятность перехода по i -му пути; l_i – величина, обратная весу i -го перехода; f_i – количество феромона в i -ом переходе; q – величина «жадности» алгоритма; p – величина «стадности» алгоритма и $q + p = 1$.

Было предложено несколько моделей АСО. Среди них три наиболее успешные:

Ant System (M. Dorigo, 1992);

Ant colony system (Dorigo, Gambarella, 1997);

MAX-MIN ant system (MMAS) (Stutzle, 2000).

Алгоритм сегментации изображений на основе метода муравьиных колоний

В данной работе для сегментации изображений используется метод, представляющий собой комбинацию метода К-средних и алгоритма муравьиных колоний [5].

Первый этап заключается в установлении количества кластеров (задается визуально управляющим экспертом) и случайной инициализации их центров. Далее, используя алгоритм кластеризации К-средних, определяется принадлежность каждого пикселя определенному кластеру. Решающую роль в этом процессе играет алгоритм муравьиных колоний. Он помогает определить связь каждого пикселя с кластерами изображения. Связь каждого пикселя с кластером определяется согласно значению вероятности, которое обратно пропорционально расстоянию между пикселем и центром кластера и переменной τ (уровнем феромона). Переменная τ определяется пропорционально минимальному расстоянию между парами центров кластеров и обратно пропорционально между пикселями и их центрами [6].

Естественно, феромон имеет свойство

испаряться (улетучиваться). В предложенном алгоритме также моделируется процесс испарения – для ослабления воздействия решений на предыдущих этапах алгоритма [8].

В отличие от алгоритма К-средних, предложенный алгоритм не останавливается при постоянстве кластерного центра на последующем этапе. Кластеризация продолжает выполняться m муравьями, каждый из которых находит свое решение. На основании всех предложенных решений m муравьев определяется лучшее [4].

Вероятность принадлежности определенного пикселя кластеру рассчитывается по формуле:

$$P_i(X_n) = \frac{[\tau_i(X_n)]^\alpha [\eta_i(X_n)]^\beta}{\sum_{j=0}^K [\tau_j(X_n)]^\alpha [\eta_j(X_n)]^\beta}, \quad (2)$$

где $P_i(X_n)$ – вероятность принадлежности пикселя X_n кластеру i ; $\tau_i(X_n)$ и $\eta_i(X_n)$ – информация о феромоне и эвристическая переменная принадлежности пикселя X_n кластеру i соответственно; α и β – константные-параметры, определяющие относительное влияние феромона и эвристической информации; K – количество кластеров.

При этом

$$\eta_i(X_n) = \frac{k}{CDist(X_n, CC_i) * PDist(X_n, PC_i)} \quad (3)$$

эвристическая информация, где X_n – пиксель номер n ; CC_i – i -й спектральный кластерный центр; PC_i – i -й пространственный центр кластера; $CDist(X_n, CC_i)$ – расстояние между (X_n, CC_i) , согласно цветовым характеристикам пикселей; $PDist(X_n, PC_i)$ – евклидово расстояние между (X_n, PC_i) , согласно расположению пикселя на изображении; k – константа, которая используется для балансировки значения коэффициентов η и τ .

На начальном этапе уровень феромона равен единице для всех дуг на графе.

Пусть выбрано m муравьев для сегментации изображения. Каждый находит свое решение, после чего среди всех решений выбирается лучшее, производится пересчет уровня феромона и проводится обновление центров кластеров согласно новым данным.

На следующей итерации для инициализации используются данные из предыдущего опыта. Снова каждым муравьем производится поиск решения. Повторяется это до тех пор, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее всем условиям.

Лучшее глобальное решение выбирается на основании следующих критериев:

1. Расстояние между кластерами по цветовым характеристикам должно быть максимальным (следовательно, кластеры будут отличаться друг от друга).

2. Общее значение расстояний по цветовым характеристикам между каждым пикселем и центром кластера должно быть минимальным, что будет гарантировать однородность кластера.

3. Общее значение евклидовых расстояний, согласно пространственным характеристикам между каждым пикселем и центром кластера, должно быть небольшим, что будет гарантировать компактность кластеров. После того как выбрано лучшее решение, обновляется значение уровня феромона, согласно выражению:

$$\tau_i(X_n) \leftarrow (1 - \rho)\tau_i(X_n) + \sum_i \Delta\tau_i(X_n), \quad (4)$$

где ρ – коэффициент испарения ($0 \leq \rho \leq 1$), воздействующий на ранее установленный уровень феромона. Параметр $\Delta\tau_i(X_n)$ в выражении (4) – разница уровня феромона,

которая добавляется успешным муравьем. Рассчитывается согласно выражению:

$$\Delta\tau_i(X_n) = \begin{cases} \frac{Q * \min(k')}{AvgCDist(k', i) * AvgPDist(k', i)}, & \text{если } X_n \subset \text{кластеру } i \\ 0, & \text{в другом случае} \end{cases} \quad (5)$$

где Q – положительная константа; $\min(k')$ – минимальное цветовое расстояние между центрами кластеров, найденное лучшим муравьем k' ; $AvgCDist(k', i)$ и $AvgPDist(k', i)$ – среднее расстояние по цветовым характеристикам и среднее пространственное расстояние между пикселями и центрами (цветовыми и пространственными) для самого лучшего муравья.

Далее представлен псевдокод приведенного алгоритма:

```

Begin
Init(k,n);
Repeat
  M: For each pixel do
    Calc(probability existence pixel in
cluster) (1);
  End
  Update (cluster center);
  If (NewCenter <> OldCenter) then
    goto M;
  Else begin

```



Рис. 1. Интерфейс настраиваемой параметрической части системы

Save(current solution);
Update(τ for each pixel) (2,3);
Correct(common solution);

End

Until criteria not reached

End

Описание разработанной системы

Разработана система, позволяющая производить визуализацию и индивидуально настраивать процесс сегментации. Имеется возможность сохранения результатов обработки в базе данных для последующего сравнения и визуального определения лучших результатов.

Система разработана на платформе Microsoft.NET Framework в среде Microsoft Visual Studio. В качестве СУБД использована Microsoft SQL Server.

Приведем фрагменты интерфейса взаимодействия с пользователем разработанной программы.

На рис. 1 находится интерфейс окна запуска выполнения алгоритма. На вход передается количество муравьев, количество итераций и количество кластеров, на которые необходимо разбить изображение. Также производится выбор изображения для сегментации (доступны различные форматы, в т. ч. в текущей версии доступна обработка непосредственно «сырых» медицинских снимков в формате DICOM). Результатом сегментации является результирующее изображение, а также значения эвристических коэффициентов α , β (формула (4)).

Все возможности работы системы приведены в диаграмме вариантов использования на рис. 2.

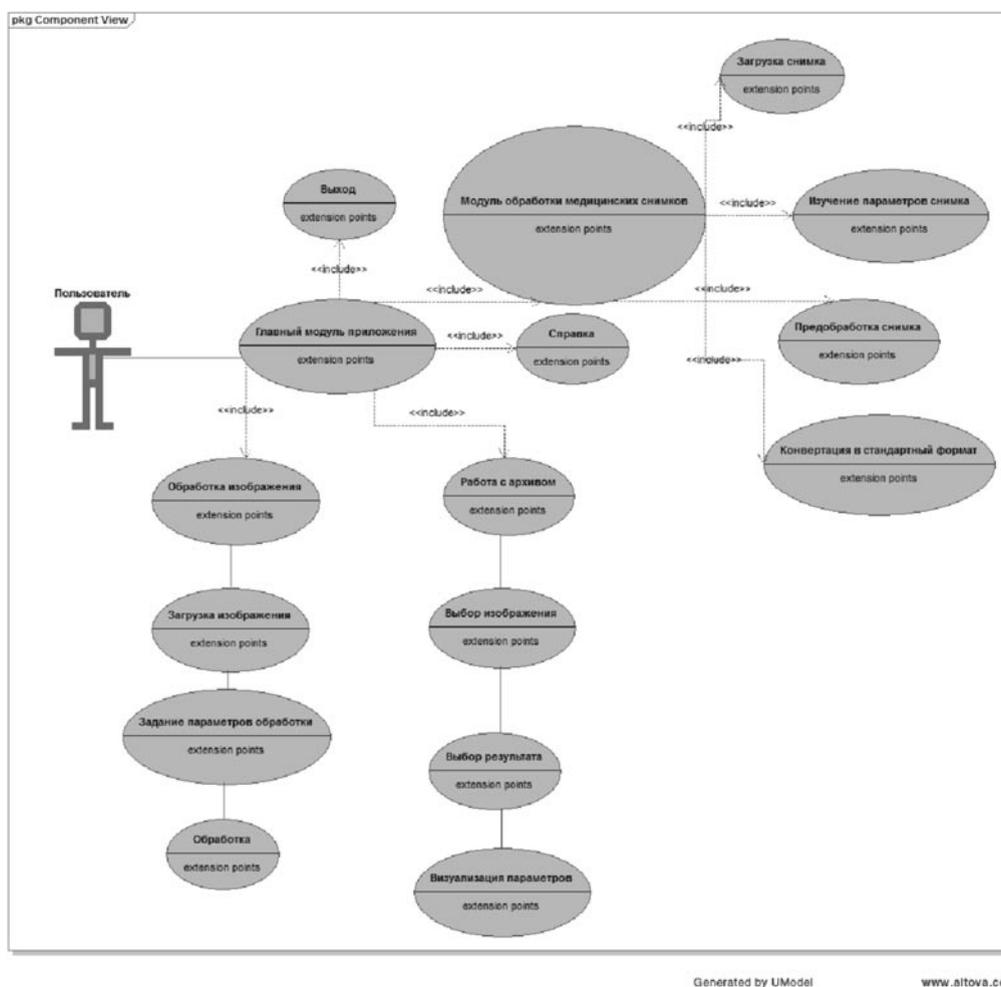


Рис. 2. UML-диаграмма вариантов использования

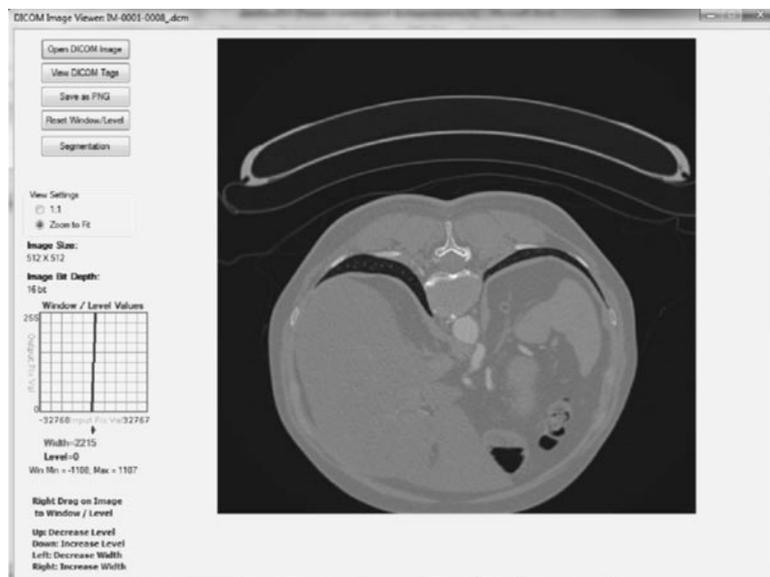


Рис. 3. Модуль обработки медицинских изображений

При помощи модуля обработки медицинских изображений (рис. 3) возможна загрузка медицинских снимков непосредственно в систему, также возможна первичная предобработка снимка, а затем последующая его сегментация. Для изучения снимка имеется возможность конвертации в обычное изображение.

Результаты работы системы

В качестве базы для проверки алгоритма использовались изображения из набора известной компании в области телемедицины – Ossiris.

Для сравнения результатов сегментации проводилась обработка одним из методов

автоматической сегментации (использован алгоритм C-means [2]), а также одним из методов интерактивной сегментации (использован интерактивный алгоритм Magic Wand [3], требующий пользовательского участия на каждом шаге).

Все представленные изображения имеют следующие параметры:

- глубина цвета 8 бит;
- разрешающая способность 300 dpi;
- количество кластеров для разбивки – 5 (за исключением рис. 6 и 8 – по четыре области).

В качестве предварительной обработки выполнено шумоподавление (за исключением изображения б). В качестве алгорит-

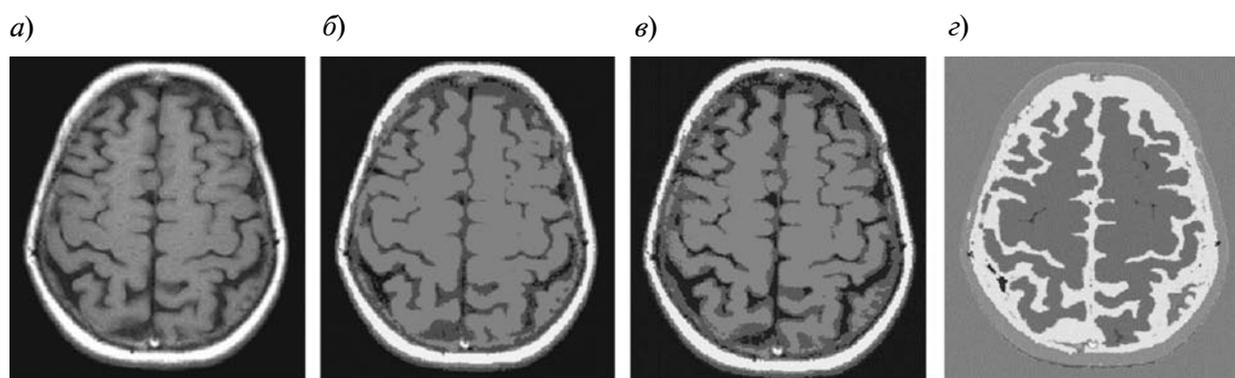


Рис. 4. Маленькая менигиома серпа в межполушарной щели:

а – исходный снимок; *б* – алгоритм муравьиных колоний; *в* – алгоритм C-means; *г* – алгоритм Magic Wand

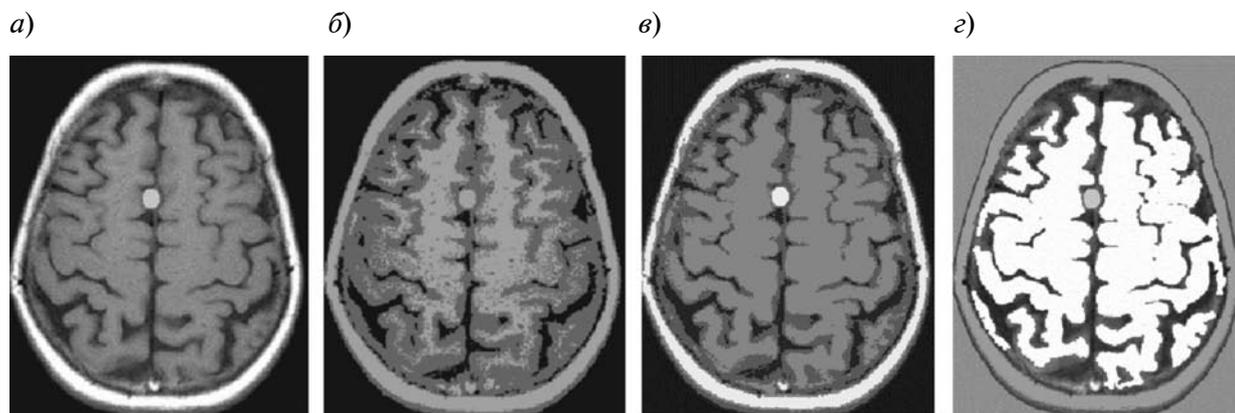


Рис. 5. Маленькая менингиома серпа в межполушарной щели с контрастным веществом: *a* – исходный снимок; *б* – алгоритм муравьиных колоний; *в* – алгоритм C-means; *г* – алгоритм Magic Wand

ма шумоподавления использован алгоритм «Размытие по Гауссу» с радиусом от 0,1 до 0,4 пикселей (исходные снимки практически не зашумлены). Оценивание качества сегментации производится сторонним наблюдателем, имеющим предварительные сведения о необходимом и верном разбиении областей на снимках.

На рис. 4 представлено МРТ-изображение маленькой менингиомы серпа в межполушарной щели до сегментации (4 *a*), после сегментации разработанным алгоритмом (4 *б*), после сегментации алгоритмом C-means (4 *в*) и алгоритмом Magic Wand (4 *г*).

Для сегментации изображение сегментировали на пять кластеров. Контуры основных объектов были очерчены, но подробная идентификация весьма затруднительна. Данный снимок содержит едва различимую опухоль в центре. Различить ее без использования контрастного вещества практически невозможно. Как видно из результатов, наилучший из них показали автоматический и разработанный алгоритмы. Результирующие контуры более явно выделены в алгоритме муравьиных колоний. Алгоритм C-means, в отличие от муравьиных колоний, осуществил неправильное соотношение некоторых контуров, в частности, в верхней части снимков левые участки извилин соотношены к разным кластерам.

На рис. 5 представлено МРТ-изобра-

жение того же снимка, что и на рис. 4, но с использованием контрастного вещества гадолиния. Соответственно 5 *a* – изображение до сегментации, *б* – после сегментации с помощью алгоритма роевых колоний; *в* и *г* – соответственно сегментация с помощью автоматического и интерактивного алгоритмов.

Параметры начальных изображений на рис. 4 и 5 идентичны. Размеры изображения – 800×600 пикселей.

Результат сегментации получился похожим на сегментацию рис. 4. Но в данном случае лучший, с точки зрения наблюдателя, результат у интерактивного алгоритма и алгоритма муравьиных колоний. Все контуры были выделены четко и получилась правильная разбивка на области. Окружность посередине рис. 5 – шваннома (невринома) – опухоль (размер 1-2 см). Чаще всего образуется из оболочек слухового и лицевого нервов. Обнаруживается с помощью компьютерной томографии или МРТ с контрастированием.

Довольно часто изображения обладают определенным шумом. Рассмотрим на рис. 6 снимок сердца, на котором присутствует средняя степень шума. Исходное изображение было зашумлено с помощью алгоритма равномерного зашумления. В качестве инструмента обработки использовался Adobe Photoshop, фильтр «Шум» с параметром «Эффект», равным 10 %. Исходное изображение имеет следующие

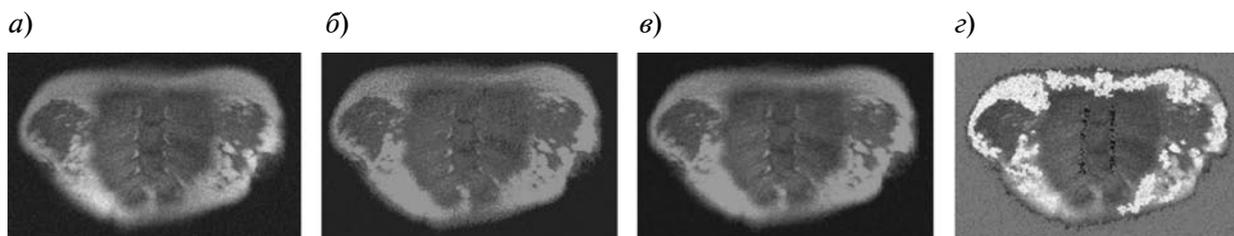


Рис. 6. Снимок сердца с искусственным зашумлением:

a – исходный снимок; *б* – алгоритм муравьиных колоний; *в* – алгоритм C-means; *г* – алгоритм Magic Wand

размеры: ширина 500 пикселей; высота 300 пикселей.

При использовании интерактивного метода сегментации для зашумленного изображения производить сегментацию довольно проблематично. Каждую часть приходилось сегментировать и отделять, используя определенный порог. В нашем случае для отделения фона снимка использовался порог 100, для отделения оболочки использовалась различная комбинация уровней порогов – 72, 32, 20. Соответственно для отделения желудочков приходилось использовать значения порогов от 5 до 15, чтобы исключить постороннюю информацию.

Что касается оценки результата, то для рис. 7 наилучший, с точки зрения наблюдателя, правильный результат представлен с помощью алгоритма C-means и муравьиных колоний.

Для оценки качества работы алгоритма необходимо также рассмотреть вариант нечетких границ контуров на снимке (нечеткая резкость). На рис. 7 приведено нечеткое изображение черепа (границы размыты).

Параметры изображения на рис. 7: ши-

рина 800 пикселей; высота 600 пикселей.

Как видно из рисунков, наиболее четко и правильно выходные контуры были выделены на рис. 7 *б* и *г* – соответственно алгоритмами муравьиных колоний и Magic Wand.

Для оценивания работы алгоритма также необходимо проверить его работоспособность на контрастных изображениях. На рис. 8 приведен пример МРТ-снимка головного мозга с контрастированием.

Как видно из полученных результатов, наилучшее решение было найдено с помощью алгоритма муравьиных колоний и алгоритма Magic Wand. На данных снимках присутствует и явно отделена сеть различных узловых элементов.

Параметры изображения на рис. 8: ширина 1024 пикселя; высота 1024 пикселя.

В таблице приведены значения коэффициентов α , β для каждого изображения, а также лучшее найденное решение и количество кластеров для разбиения.

Как видно из представленной таблицы, для решения задач в общем случае не существует одного универсального алгоритма.

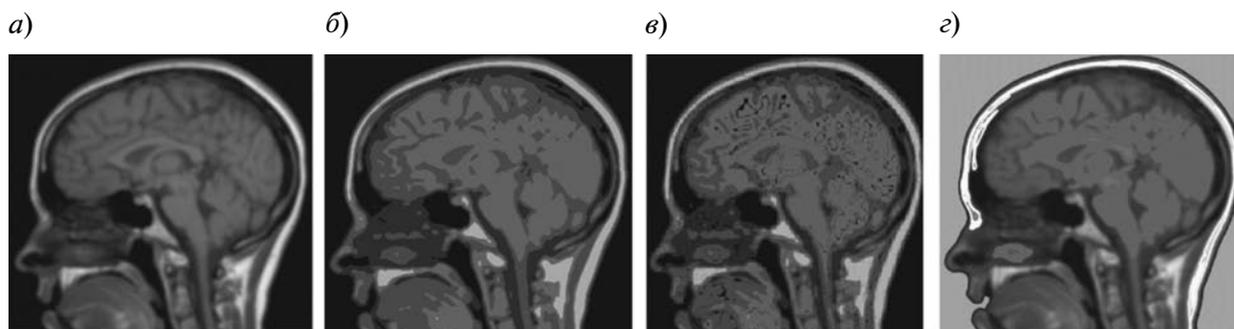


Рис. 7. Снимок черепа с размытыми исходными контурами:

a – исходный снимок; *б* – алгоритм муравьиных колоний; *в* – алгоритм C-means; *г* – алгоритм Magic Wand

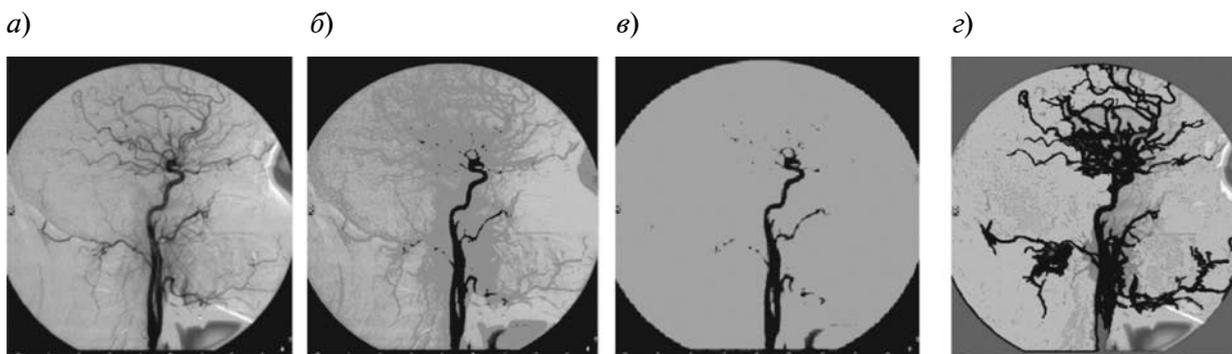


Рис. 8. МРТ-снимок головного мозга с контрастированием:
a – исходный снимок; *б* – алгоритм муравьиных колоний; *в* – алгоритм C-means; *г* – алгоритм Magic Wand

Результаты исследований

Номер изображения	α	β	Наилучшее решение	Количество кластеров
4	0,35	0,8	ACO, C-means	5
5	0,7	0,7	ACO, C-means	5
6	0,25	0,08	ACO, C-Means	4
7	0,02	0,12	ACO, Magic Wand	5
8	0,1	0,3	Magic Wand	4

В разных случаях получаются различные результаты для разных снимков с помощью одного и того же алгоритма. Разработанный алгоритм показал хорошую динамику: в четырех из пяти снимков результаты его работы были правильными. Данные результаты подтверждают необходимость проведения дальнейших более глубоких исследований разработанных положений.

Разработана компьютерная система сегментации изображений на основании модифицированного алгоритма муравьиных колоний и К-средних. Проведена апробация на

тестовых изображениях (benchmarks) компании Ossiris. Апробация показала высокую эффективность разработанного алгоритма (в четырех из пяти снимков совершенно разных по цветовым характеристикам было получено правильное решение).

Разработанный алгоритм можно доработать и улучшить, в частности, введением в систему индекса Дана для сравнения полученного результата с эталонным. Также в данном случае появится возможность автоматизировать и оптимизировать подбор эвристических параметров до необходимых оптимальных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pal N.R., Pal S.K. A review on image segmentation techniques // Pattern Recognition. 1993. No. 9(26). Pp. 1277–1294.
2. Вежневцев А. Методы сегментации изображений: автоматическая сегментация [Электронный ресурс] / URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/147>
3. Конушин В. Методы сегментации изображений: интерактивная сегментация [Электронный ресурс] / URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/172>

4. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1996. Part B. 1(26). Pp. 29–41.
5. Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А., Эль-Хатиб А.И. Сегментация изображений методом муравьиных колоний // Вестник Херсонского национального технического университета. Херсон, 2013. № 1(46). С. 204–211.

6. Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А. Компьютерная система сегментация медицинских изображений на основе алгоритма муравьиных колоний // VIII Всеукраинская науч.-практ. конф. Современные тенденции развития информационных технологий в науке, образовании и экономике. Сб. тезисов. Луганск, 2014. С. 130–133.
7. Dorigo M., Stzle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge. MIT Press, 2004. 35 p.
8. Huizhi C., Huang P., Luo S. A Novel Image

Segmentation Algorithm Based on Artificial Ant Colonies // *Medical Imaging and Informatics: 2nd Internat. Conf. Beijing*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. P. 52.

9. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley: Reading, MA, 1989. P. 68.

10. Bishop C.M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: Oxford University Press, 1995. P. 78.

REFERENCES

1. Pal N.R., Pal S.K. A review on image segmentation techniques, *Pattern Recognition*. 1993, No. 9(26), Pp. 1277–1294.

2. Vezhnevets A. *Metody segmentatsii zobrazheniy: avtomaticheskaya segmentatsiya* [Methods the image segmentation: automatic segmentation]. Available: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/147>

3. Konushin V. *Metody segmentatsii izobrazheniy: interaktivnaya segmentatsiya* [Methods of image segmentation: an interactive segmentation]. Available: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/172>

4. Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1996, Part B, No. 1(26). Pp. 29–41.

5. Skobcov Yu.A., El-Hatib S.A., El-Hatib A.I. Segmentacija izobrazhenij metodom murav'inyh kolonij [Image segmentation by ant colonies]. *Vestnik Hersonskogo Nacional'nogo Tehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Kherson National Technical University]. Herson, 2013, No. 1(46), Pp. 204–211. (ukr)

6. Skobcov Yu.A., El-Hatib S.A. Komp'uternaya sistema segmentatsii meditsinskih izobrazheniy na

osnove algoritma murav'inyh koloniy [The computer system of medical image segmentation based on ant colony algorithm]. *VIII Vseukrainskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Sovremennue tendentsii razvitiya informatsionnyh tekhnologiy v nauke, obrazovanii i ekonomike* [Abstracts of Materials VIII All-Ukrainian Scientific-practical Conference Modern Trends of Development of Information Technologies in Science, Education and the Economy]. Lugansk, 2014, Pp. 130–133. (ukr)

7. Dorigo M., Stzle T. *Ant Colony Optimization*, Cambridge, MIT Press, 2004, 35 p.

8. Huizhi C., Huang P., Luo S. A Novel Image Segmentation Algorithm Based on Artificial Ant Colonies, *Medical Imaging and Informatics: 2nd International Conference*. Beijing, Berlin: Springer-Verlag, 2007, P. 52.

9. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley: Reading, MA, 1989, P. 68.

10. Bishop C.M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: Oxford University Press, 1995, P. 78.

ЭЛЬ-ХАТИБ Самер Аднан – аспирант кафедры автоматизированных систем управления Донецкого национального технического университета.

83001, Украина, г. Донецк, ул. Артема, д. 58.

E-mail: samer_elkhatib@mail.ru

EL-KHATIB, Samer A. *Donetsk National Technical University*.

83001, Artema Str. 58, Donetsk, Ukraine.

E-mail: samer_elkhatib@mail.ru

СКОБЦОВ Юрий Александрович – заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Донецкого национального технического университета, доктор технических наук.

83000, Украина, г. Донецк, ул. Артема, д. 58.

E-mail: skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua

SKOBTCOV Yury A. *Donetsk National Technical University*.

83000, Artema Str. 58, Donetsk, Ukraine.

E-mail: skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua



Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.2

УДК 004.77

*В.В. Глазунов, М.А. Курочкин, С.Г. Попов
Чунминг Ву, Леибо Лиу*

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЛАЧНЫМ СЕРВИСОМ ТЕЛЕМАТИЧЕСКОЙ КАРТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

*V.V. Glazunov, M.A. Kurochkin, S.G. Popov,
Chunming Wu, Leibo Liu*

MANAGEMENT TECHNOLOGY FOR THE CLOUD SERVICE OF THE TELEMATICS MAP IN THE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM

Непрерывный доступ к сервисам из подвижного транспортного средства повышает безопасность и обеспечивает экологичность функционирования транспортной инфраструктуры в условиях крупных агломераций. Качество предоставления таких сервисов определяется наличием двусторонней связи между транспортным средством (ТС) и стационарной высокопроизводительной вычислительной системой (СВВС). Отсутствие гарантированного уровня сигнала глобальных и локальных сетей требует новых подходов к решению проблемы обеспечения непрерывной передачи данных между транспортным средством и стационарной вычислительной системой в условиях высокой динамики сетей.

Перспективным направлением увеличения длительности устойчивой связи транспортного средства с СВВС является оперативное получение транспортным средством списка доступных сетей от внешнего источника. Таким источником становится телематическая карта – набор низкоуровневых методов, обеспечивающих формирование и управление списком сетей. Набор этих методов обеспечивает получение данных о телематической обстановке от мобильных транспортных средств, обобщение полученных данных по географическому и временному признаку, реализацию запросов ТС к данным обобщенной карты для планирования подключения к доступным телематическим ресурсам.

В статье рассмотрена новая технология формирования сетей передачи данных транспортных средств с использованием мультипротокольного узла и телематической карты. Основу технологии составляют процессы сбора данных о сетях на мультипротокольных узлах, передачи собранных данных в облачный сервис телематической карты, обобщения данных и выполнения запросов о доступных сетях в заданном регионе. Предложена полностью автоматическая технология управления данными о телематической обстановке региона. С целью проверки предложенного подхода реализован прототип информационной системы, испытания которого продемонстрировали реализуемость на практике технического решения задачи управления списками беспроводных сетей для транспортных средств.

ТЕЛЕМАТИЧЕСКАЯ КАРТА; ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА; МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНЫЙ УЗЕЛ; ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ БАЗА ДАННЫХ; MESH-СЕТИ; БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ; WI-FI; LTE.

Continuous access to services from a mobile device improves safety and provides ecological functioning of the transport infrastructure of metropolitan agglomerations. The quality of these services is determined by two-way communication between the vehicle and the stationary high-performance computing (HPC) system. As the signal strength in global and local networks varies, there is a need for new approaches to provide a

continuous data transfer between the vehicle and the stationary HPC system in highly dynamic networks.

One of the promising ways to increase the duration of stable communication between the vehicle and the HPC system is through getting a list of available networks from an external source, e.g., a telematics map, which is a set of low-level methods that ensure the formation and management of the list of networks. Such a set allows retrieving data on the telematics environment from vehicles, summarizing it on a geographical and temporal basis, and implementing the vehicle requests for the data of the generalized map to plan connections to available telematics resources.

The article describes a new technology that helps to establish the data networks of vehicles by using the telematics map and the multiprotocol node. The technology is based on collecting network data from multiprotocol nodes, transmitting the collected data to the cloud service of the telematics map, summarizing the data and executing queries about the available networks in a given region. Thus, the paper proposes a fully automatic technology to manage the data on the telematics environment of a region. In order to test the proposed approach, a prototype of the information system was implemented. Its tests demonstrated the feasibility of the technical solutions in regard to managing the lists of wireless networks as applied to vehicles.

TELEMATICS MAP; CLOUD SERVICE; INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM; MULTIPROTOCOL NODE; SPATIO-TEMPORAL DATABASE; MESH-NETWORKS; WIRELESS NETWORKS; WI-FI; LTE.

Современные интеллектуальные транспортные системы предоставляют транспортным средствам высокоуровневые сервисы, такие как прокладка маршрутов движения, информирование о погоде и дорожной обстановке, обновление бортового программного обеспечения, контроль состояния узлов и агрегатов автомобиля, обеспечивая безопасность движения функционирования транспортной инфраструктуры города [1]. Информационные ресурсы этих сервисов располагаются вне автомобиля, в форме облачных сервисов [2]. Высокое качество этих сервисов может быть обеспечено непрерывным двусторонним взаимодействием транспортного средства с облачным сервисом [3]. Однако в настоящее время подобное взаимодействие обеспечивается только одним каналом связи глобальной сети передачи данных [4]. В зонах с недостаточным уровнем сигнала происходит нарушение сетевого соединения, что делает недоступным получение необходимого внешнего сервиса [5]. Устранение этого недостатка возможно дополнением телекоммуникационной компоненты интеллектуальной транспортной системы посредством механизмов V2V, V2I и V2C [6] через технологии DSRC, MESH, VANET, MANET, что обеспечивает альтернативные пути подключения к внешним сервисам и повышает надежность соединения.

Перспективная концепция мультипротокольного узла обеспечивает подключение транспортного средства к нескольким сетям разных технологий одновременно и передачу данных по любой из них [7]. Концепция предусматривает оснащение мультипротокольным узлом всех транспортных средств, т. к. при использовании мультипротокольного узла автономно транспортное средство получает данные о доступных сетях «здесь и сейчас» [8] в радиусе 300 м от DSRC или Wi-Fi, что в условиях непрерывного перемещения недостаточно для обеспечения длительной и устойчивой передачи данных. Реализация концепции обеспечит непрерывное поддержание списка активных сетей в каждой точке маршрута непосредственно на борту каждого транспортного средства.

В статье описывается технология автоматического управления данными о доступности беспроводных сетей из движущегося транспортного средства и особенности технической реализации информационной системы, основанной на телематической карте.

Реализация прототипа МПУ для формирования и управления данными телематической карты продемонстрировала работоспособность предложенного метода формирования списка доступных беспроводных сетей в любой точке маршрута движения транспортного средства.

Связанные работы

Современное развитие средств автомобильной телематики предполагает использование каналов связи различных технологий для реализации сервисов водителя и пассажиров. В частности, компания Ford реализует технологию Sync для непрерывного соединения транспортного средства с облачным сервисом [9–11]. Другие производители автомобилей, такие как Mercedes и BMW, реализуют схожие системы. В них используется канал связи глобальной сети технологии LTE и данные GPS-приемника на борту автомобиля. Локальные функции оплаты проезда, регистрации въезда и выезда реализованы на основе технологии DSRC. Активно развиваются технологии VANET и MANET с целью передачи трафика между движущимися автомобилями [12].

Интеграция представления данных о беспроводных локальных и глобальных сетях на основе геоинформационных систем используется при построении карт покрытия глобальными сотовыми сетями, информирования о наличии стационарных точек доступа Wi-Fi и применяется для визуального представления с целью информирования пользователей о доступных телекоммуникационных ресурсах. Как правило, данные хранятся в виде статического слоя геоинформационной системы [1].

Для анализа данных о местоположении транспортного средства используются встроенные датчики GPS с отправкой данных в глобальную сеть.

Технологии интеграции телематических средств и геоинформационных систем осуществляются в системах мониторинга транспортных средств, городского общественного транспорта, систем реагирования неотложных служб, таких как ЭРА-ГЛОНАСС, E-call. Объединение предложенных перспективных технологий повышает качество предоставления сервисов на борту автомобиля.

Управление данными в задаче формирования телематической карты

Для получения данных о доступных

сетях в регионе движения транспортного средства используется облачный сервис телематической карты, обеспечивающий накопление и учет данных о потенциальных точках доступа к Сети, уровне сигнала и режимах доступа к ресурсам различных технологий, таких как LTE, DSRC, стационарный Wi-Fi, автомобильные MESH-сети. На рис. 1 схематично представлен фрагмент описания телематических ресурсов региона и его интерпретация в телематической карте и на местности.

Сервис телематической карты предоставляет набор низкоуровневых методов для доступа мультипротокольного узла транспортного средства к описанию телематических ресурсов региона. К основным методам следует отнести методы:

1) сбора и регистрация первичных данных:

- о состоянии интерфейсов телематических устройств транспортного средства;

- о режимах совместного использования интерфейсов;

- об уровне сигналов доступных сетей на каждом интерфейсе телематического устройства транспортного средства в процессе его движения;

2) агрегации данных о сетевой обстановке в конкретной географической точке на основе пространственно-временных запросов;

3) формирования ответов на запросы транспортных средств о телематических возможностях в географическом регионе движения транспортного средства.

Основной технологической задачей функционирования сервиса является поддержание состояния актуальности данных о телематической обстановке. Решение задачи обеспечивается процессом непрерывного сбора и систематизации данных о состоянии сети с транспортных средств в асинхронном режиме.

Процесс взаимодействия мультипротокольного узла транспортного средства и облачного сервиса состоит из трех этапов:

- передача данных о телематической обстановке от транспортного средства;

- агрегация данных о точках доступа во времени и пространстве;

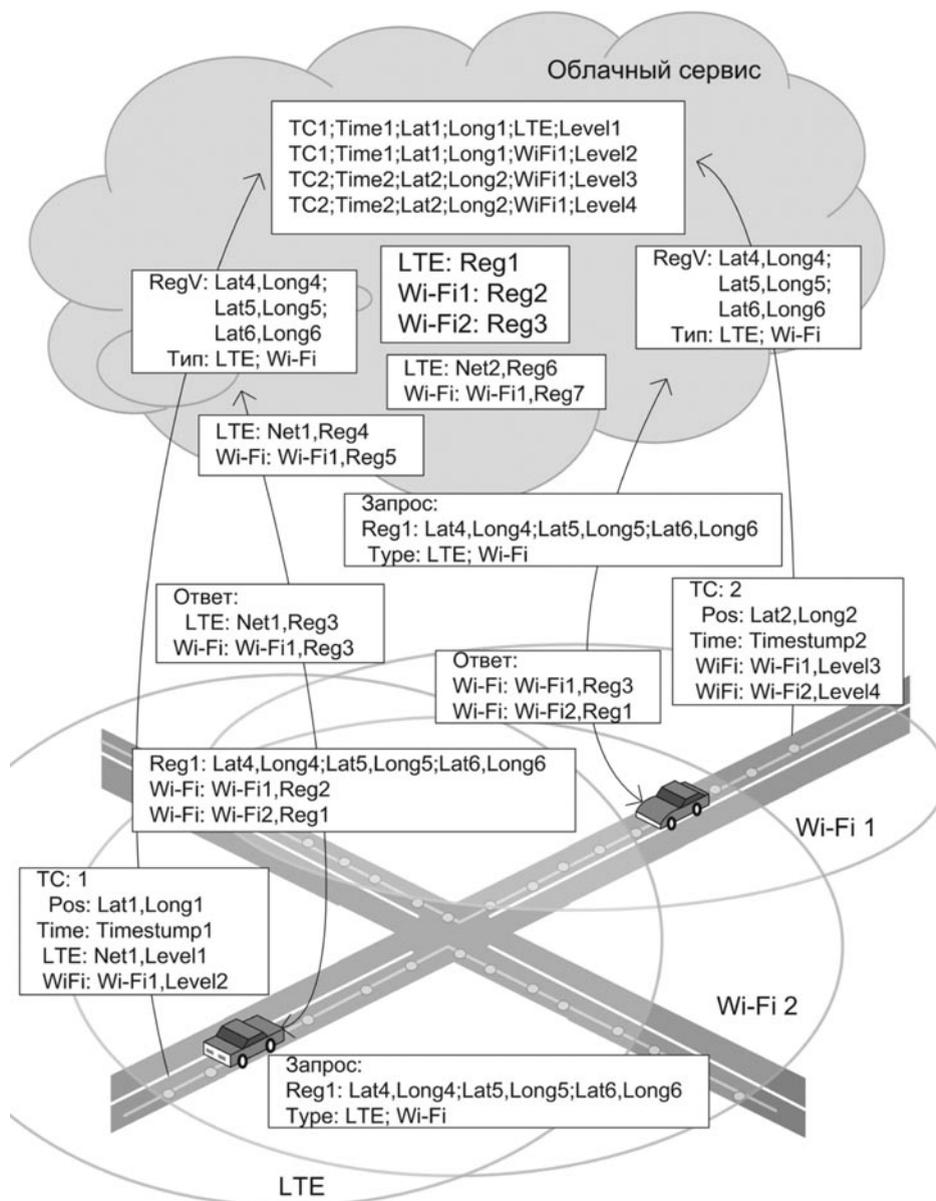


Рис. 1. Представление данных о телематических ресурсах и их пространственная интерпретация

- передача данных о доступных сетях на борт транспортного средства.

Предлагаемая технология обеспечивает взаимодействие транспортных средств между собой для расширения области видимости беспроводных и проводных сетей по маршруту движения транспортного средства.

Обобщённый алгоритм взаимодействия транспортного средства и облачного сервиса приведен на рис. 2.

Периодический опрос уровня сигнала глобальных и локальных сетей осуществляется непрерывно на мультипротокольном узле транспортного средства. Частота опроса зависит от скорости движения. Данные записываются в локальный файл МПУ и передаются в облачный сервис при наступлении подходящего момента: например, при наличии широкого или бесплатного канала связи с облаком.

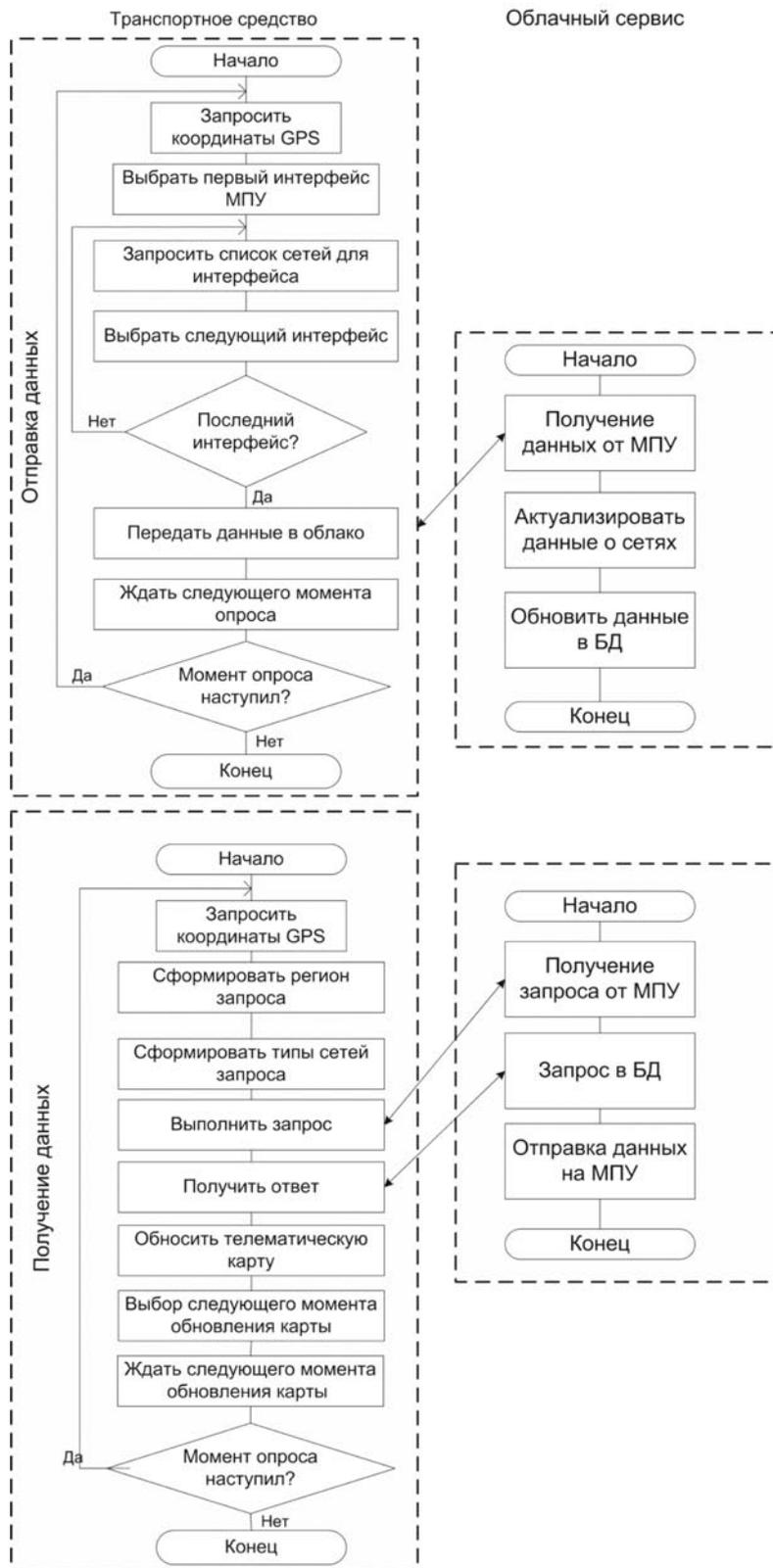


Рис. 2. Обобщённый алгоритм взаимодействия транспортного средства и облачного сервиса

Обобщение переданных данных о состоянии сетей в облаке осуществляется в модуле актуализации состояния сетей облачного сервиса на основе двух критериев: доступности сети и усреднённого во времени уровня сигнала в текущей точке. Географическая интерпретация метода обобщения приведена на рис. 3.

При необходимости каждый мультипротокольный узел осуществляет запрос к облачному сервису, передавая данные о параметрах своих технических средств и желаемом регионе получения данных о телематической обстановке. Предложенный алгоритм обобщения обеспечивает фиксированную плотность точек в каждой географической области для каждой сети, что позволяет обеспечить контроль объема данных локальной и глобальной базы данных.

Технология хранения данных и выполнения запросов к телематической карте

Проведенный анализ данных позволил выделить четыре главные сущности задачи:

сеть передачи данных, транспортное средство, мультипротокольный узел и точку передачи данных. Каждая точка передачи данных от транспортного средства определяется географическими координатами и временем передачи сообщения. Транспортное средство идентифицируется VIN-номером и свойствами мультипротокольного узла: типом, числом и работоспособностью его интерфейсов. Каждая сеть характеризуется именем, идентификатором и уровнем сигнала на траектории движения транспортного средства. Хранение первичных и обобщенных данных о телематических ресурсах осуществляется в реляционных базах данных. Базы данных расположены как в облачном сервисе, так и на мультипротокольном узле транспортного средства.

База данных облачного сервиса хранит первичные данные от транспортных средств, обобщенную карту и права доступа к общедоступным ресурсам.

База данных мультипротокольного узла предназначена для предварительного хране-

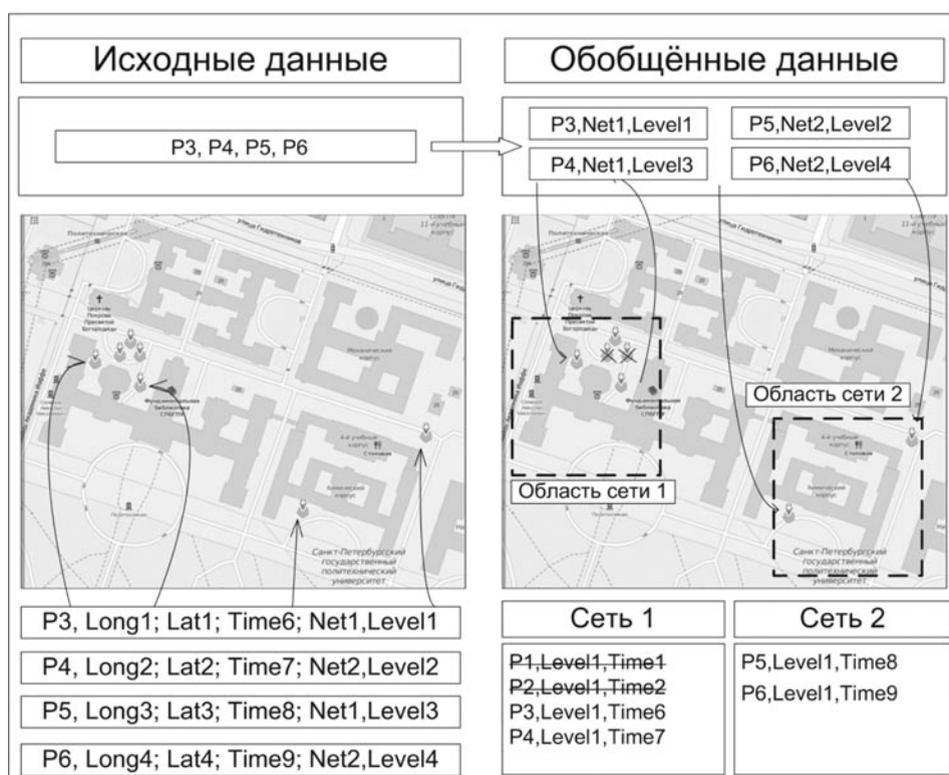


Рис. 3. Географическая интерпретация метода обобщения данных телематической карты

ния данных об обнаруженных сетях, телематической обстановке региона движения транспортного средства и прав доступа к частным беспроводным сетям. Схема базы данных мультипротокольного узла является копией базы данных облачного сервиса.

В процессе функционирования системы управления данными можно выделить потоки запросов к локальной и глобальной базам данных. Их можно разделить на потоки запросов от аппаратуры и от пользовательского программного обеспечения.

К потокам запросов мультипротокольного узла относятся:

- от аппаратуры в базу данных:
определение доступных стационарных сетей сетей Wi-Fi;
определение уровня сигнала сети LTE;
- от программного обеспечения:

запрос на передачу первичных данных о телематической обстановке;

запрос обобщенных данных от телематической карты.

Запросы на мультипротокольном узле реализованы в модулях прикладного программного обеспечения.

К потокам данных облачного сервиса относится выполнение запроса на обобщение первичных данных к актуальному состоянию телематической карты. Запрос реализован в виде триггера средствами языка СУБД.

Графическое представление потока запросов между аппаратурой и модулями программного обеспечения облачного сервиса и мультипротокольного узла показано на рис. 4.

Поток запросов обеспечивает непре-

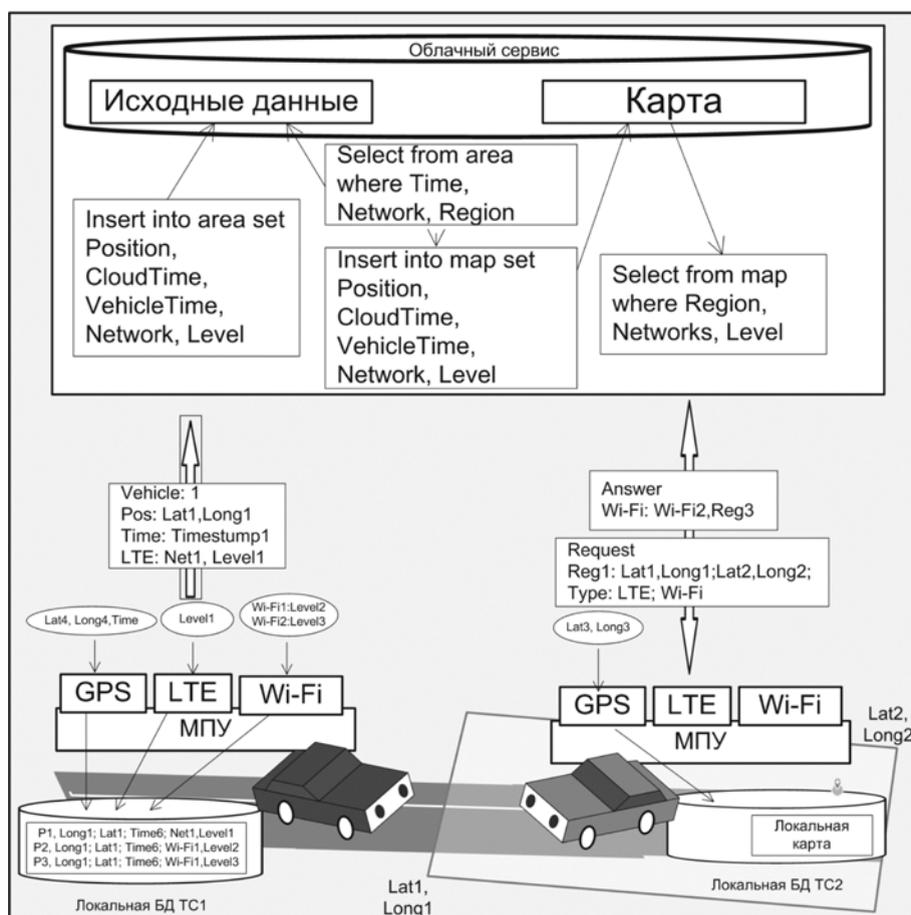


Рис. 4. Схема потоков запросов между аппаратурой мультипротокольного узла и базами данных

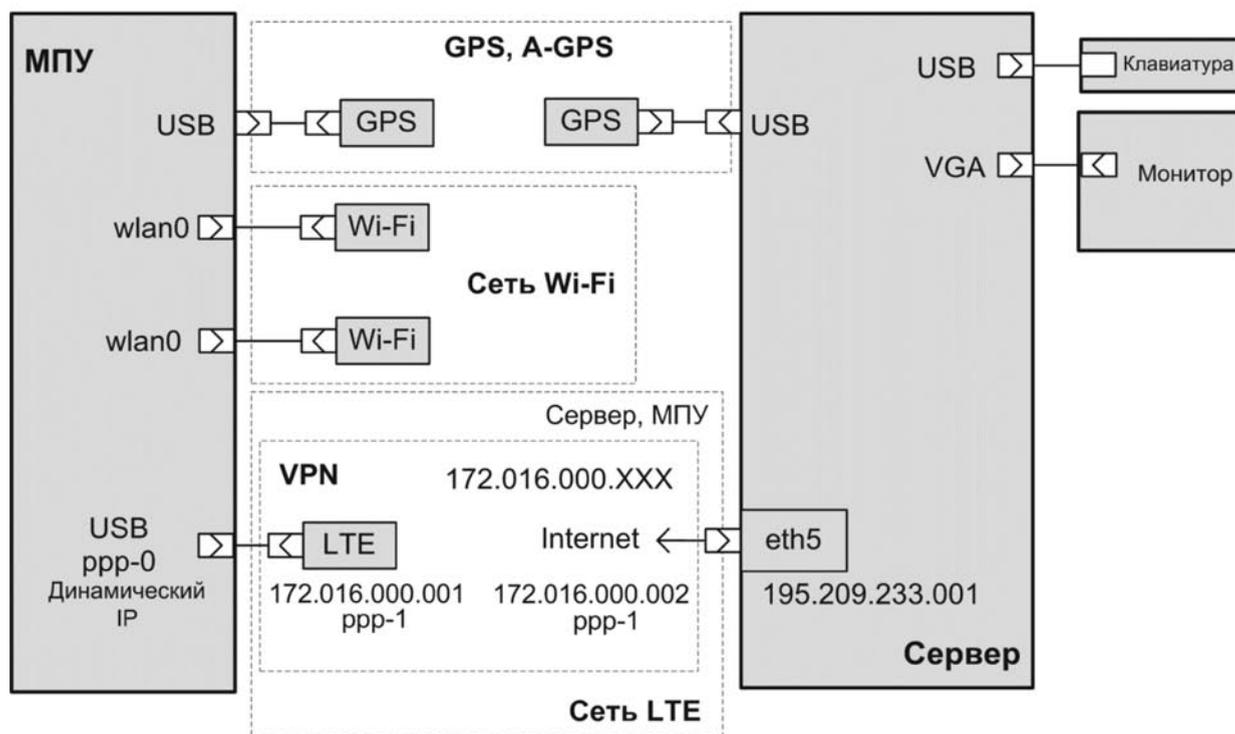


Рис. 5. Конфигурация программно-аппаратного стенда проведения эксперимента

рывное обновление и получение данных о телематической обстановке между мультипротокольными узлами и облачным сервисом от многих транспортных средств.

Программно-аппаратная реализация прототипа телематической карты

Реализация алгоритмов взаимодействия мультипротокольного узла с облачным сервисом осуществлялась с использованием технических средств программно-аппаратного стенда мультипротокольных узлов [11]. Для проведения эксперимента была собрана схема стенда, конфигурация которого приведена на рис. 5.

Мультипротокольный узел оснащен приемником GPS BU-355S4, встроенным адаптером Wi-Fi AR9285 стандарта 802.11bgn и модемом для передачи данных сотовой сети стандарта 4G M100-4. В функции MPU входил периодический запрос данных о состоянии сетей Wi-Fi и LTE. Результаты запроса помещались в локальную базу данных, а затем отправлялись на сервер по каналу LTE.

В функции сервера входило получение файла с данными, размещение исходных данных в базе данных, реализация запроса на выборку с учетом географических и временных параметров, формирование ответа на запрос мультипротокольного узла.

Для проведения экспериментов была разработана архитектура, обеспечивающая взаимодействие системного и прикладного программного обеспечения MPU и облачного сервиса на базе операционной системы GNU/Linux Debian 7.4. Операционная система установлена на имитаторе нагрузки и мультипротокольном узле. Схема взаимодействия программного обеспечения стенда приведена на рис. 6.

На имитаторе нагрузки и MPU периодически выполняется процедура синхронизации системных часов с использованием сигнала точного времени от GPS. Синхронизацию выполняет служба точного времени ntpd, получая сигнал от службы интерфейса с GPS-приемником gpsd через общие блоки разделяемой памяти (shm). Частота опроса устройства GPS составляет 0,5 Гц.

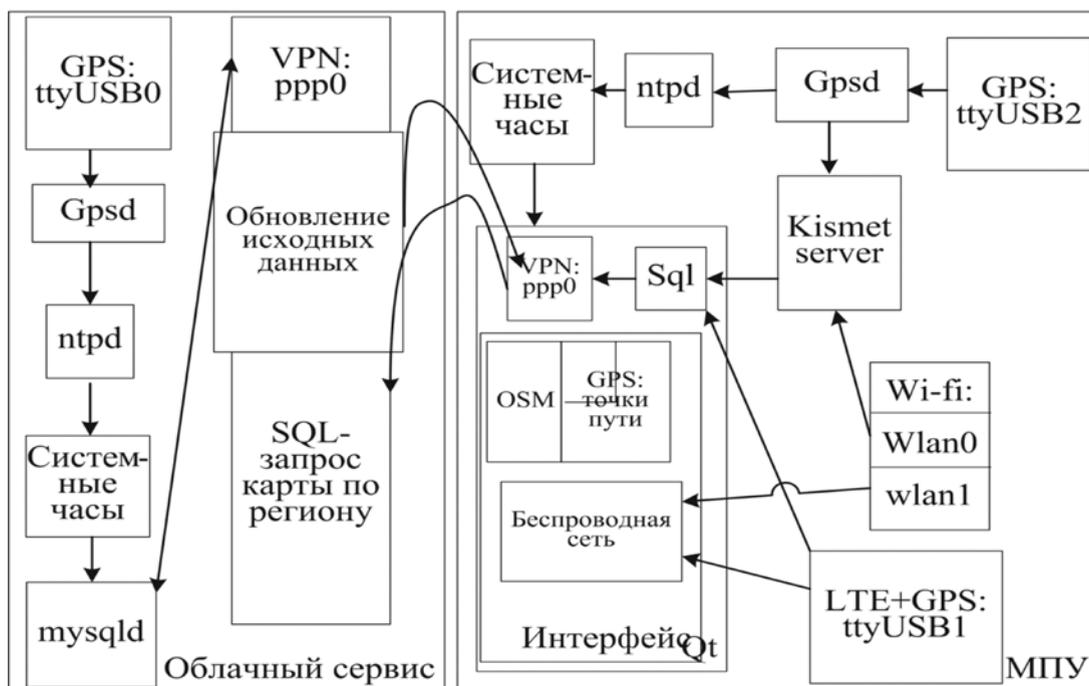


Рис. 6. Схема взаимодействия программного обеспечения для опроса локальных и глобальных сетей

Для сбора данных о локальных беспроводных сетях Wi-Fi применяется модуль kismet server, опрашивающий приемопередатчик Wi-Fi. Подключение к модулю осуществляется через интерфейс wlan0.

Данные от модуля сбора отправляются через API в модуль sql для записи в базу данных и модуль графического интерфейса, для отображения на экране.

Данные из базы данных с заданной периодичностью отправляются на сервер, расположенный на имитаторе нагрузки. В качестве реляционной базы данных используется MySQL версии 5.5.35.

Связь между МПУ и имитатором нагрузки осуществляется через выделенный VPN-канал, посредством глобальных каналов связи. Физическим устройством доступа к глобальной сети служит LTE модем 4G, подключение использует интерфейс ppp0.

Приемопередатчик Wi-Fi с интерфейсом wlan1 предназначен для сравнения списка сетей, полученных из облачного сервиса и доступных для подключения в текущий момент на МПУ.

Прикладное программное обеспечение разработано с использованием кросс-платформенного фреймворка Qt: для взаимодействия с локальной и удаленной базами данных используется модуль QSql; для формирования графической части применяется модуль Location с картографической информацией Open Street Map. Отображение текущих доступных и предполагаемых сетей по маршруту движения выполнено наложением слоев поверх изображения карты. Установки программного обеспечения в процессе проведения эксперимента приведены в табл. 1.

Ограничение частоты получения координат от приемника GPS в 2 Гц связано с особенностями реализации микросхемы приемника гражданского диапазона и драйвера устройства, функционирующего на скорости 4800 бит/с через локальный коммуникационный порт.

Особенностью установки программного обеспечения являлась независимость частоты опроса локальных и глобальных сетей от частоты опроса устройства GPS, обеспеченная функционированием этих

Таблица 1

Значения параметров программно-аппаратных средств

Параметр, константа	Значение
Источник координат	GPS
Способ хранения данных	В локальном файле и СУБД
Частота получения координат, Гц	2
Частота опроса Wi-Fi, частота, Гц	10
Частота опроса LTE, Гц	2
Тип трафика	UDP
Тип канала связи	Туннель поверх LTE

процессов в разных потоках операционной системы, что повышало точность представления уровня сигнала. Предложенная схема показала работоспособность технологии на всех этапах работы прототипа системы как в стационарном режиме, так и во время движения транспортного средства.

Тестирование технологии определения доступных сетей из транспортного средства

Для проверки работоспособности алгоритма и технологии управления данными телематической карты была проведена серия экспериментов, которые демонстрировали этапы обработки и передачи данных о глобальных и локальных беспроводных сетях при движении транспортного средства на городском маршруте. Для этого макет

мультипротокольного узла был размещен на транспортном средстве, движущемся по замкнутой траектории. Траектория движения транспортного средства по тестовому маршруту приведена на рис. 7.

Эксперимент демонстрировал сбор данных о телематической обстановке и состоял в непрерывной регистрации доступности и уровней сигналов глобальной и локальных беспроводных сетей из транспортного средства. На каждом этапе эксперимента задавалась средняя скорость движения и определялись время сеанса, число точек GPS, число опросов локальной и глобальной сетей, число зарегистрированных локальных сетей. Во время движения вычислялись значения параметров: средний уровень сигнала и среднее время видимости сети.

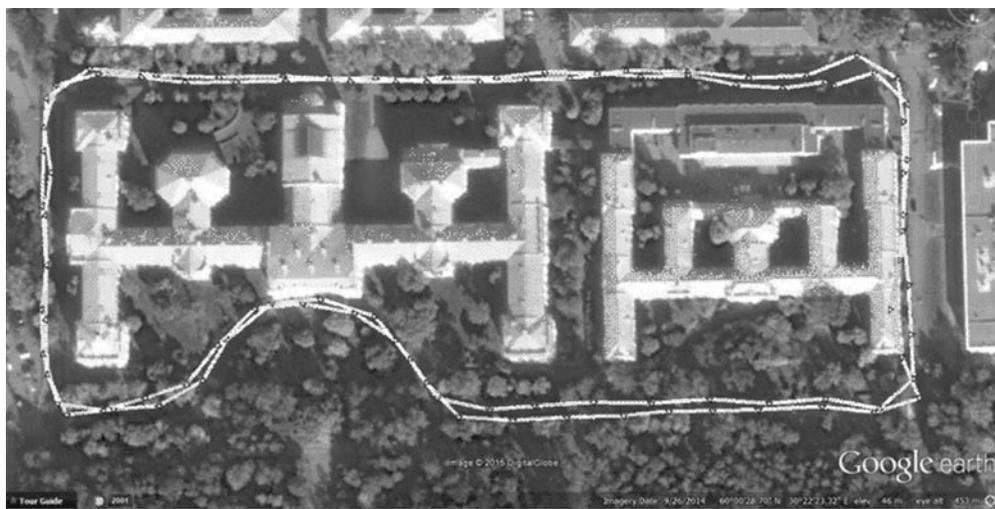


Рис. 7. Траектория движения транспортного средства

Таблица 2

Значения параметров результатов экспериментов

Наименование параметра	Скорость движения (км/ч)						
	10	15	18	20	23	26	28
Длительность сеанса регистрации, мин	16	10	8	7	6	5	4
Объем данных, Кбайт	697	504	480	457	354	274	200
Средний уровень сигнала LTE, дБ	-59	-64	-65	-67	-67	-68	-69
Число зарегистрированных сетей Wi-Fi, шт.	215	181	179	164	159	159	155
Среднее время доступности для выбранных Wi-Fi сетей, с	28	19	10	7	6	4	3

В ходе экспериментов по регистрации и отправке данных было собрано 10 Мб первичных данных о беспроводных локальных сетях. Выявлены зависимости объемов передаваемых данных и числа сетей от средней скорости движения транспортного средства в условиях почти постоянной радиообстановки. Для этого транспортное средство двигалось по траектории, представленной

на рис. 7, программное обеспечение мультипротокольного узла опрашивало датчик GPS, выполняло запрос к базе данных тематической карты, регистрировало текущую радиообстановку и сравнивало с полученными данными от телематического сервиса. Сводные результаты эксперимента приведены в табл. 2.

На рис. 8 приведены графики зависи-

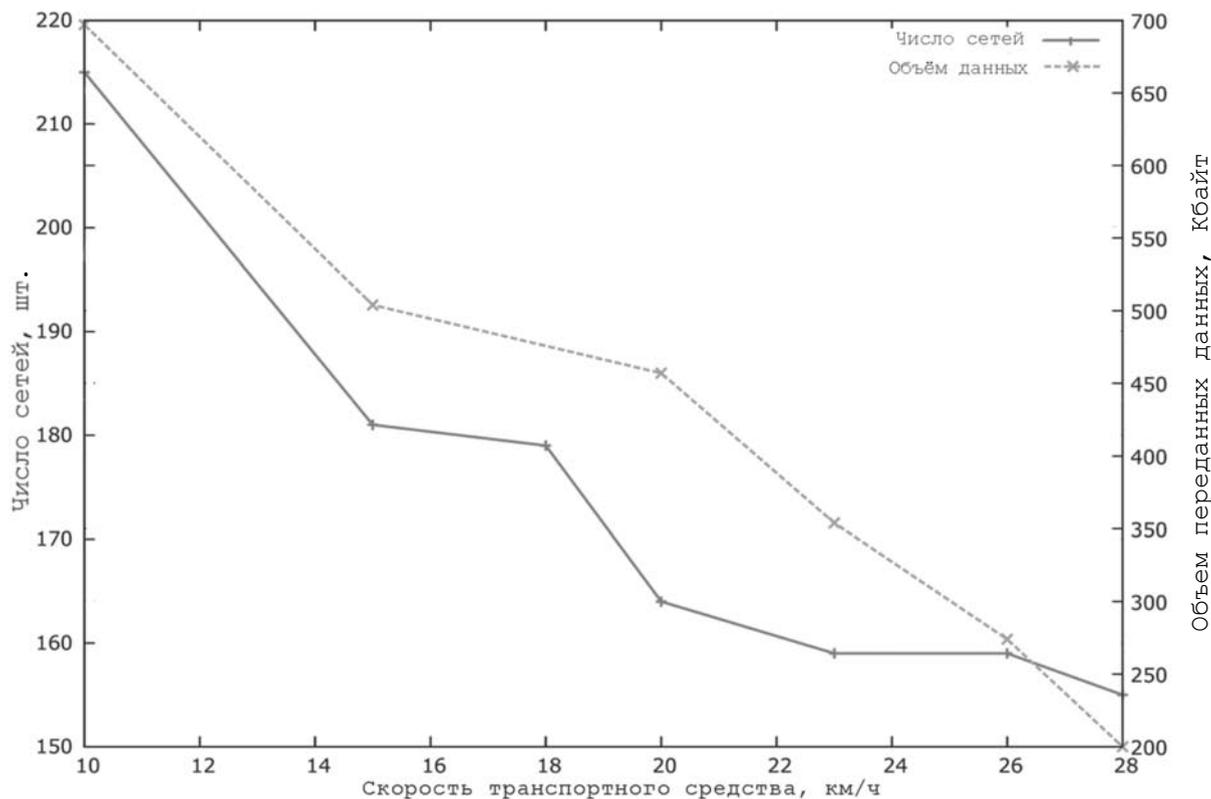


Рис. 8. Графики зависимости числа обнаруженных сетей и объема данных от средней скорости движения транспортного средства

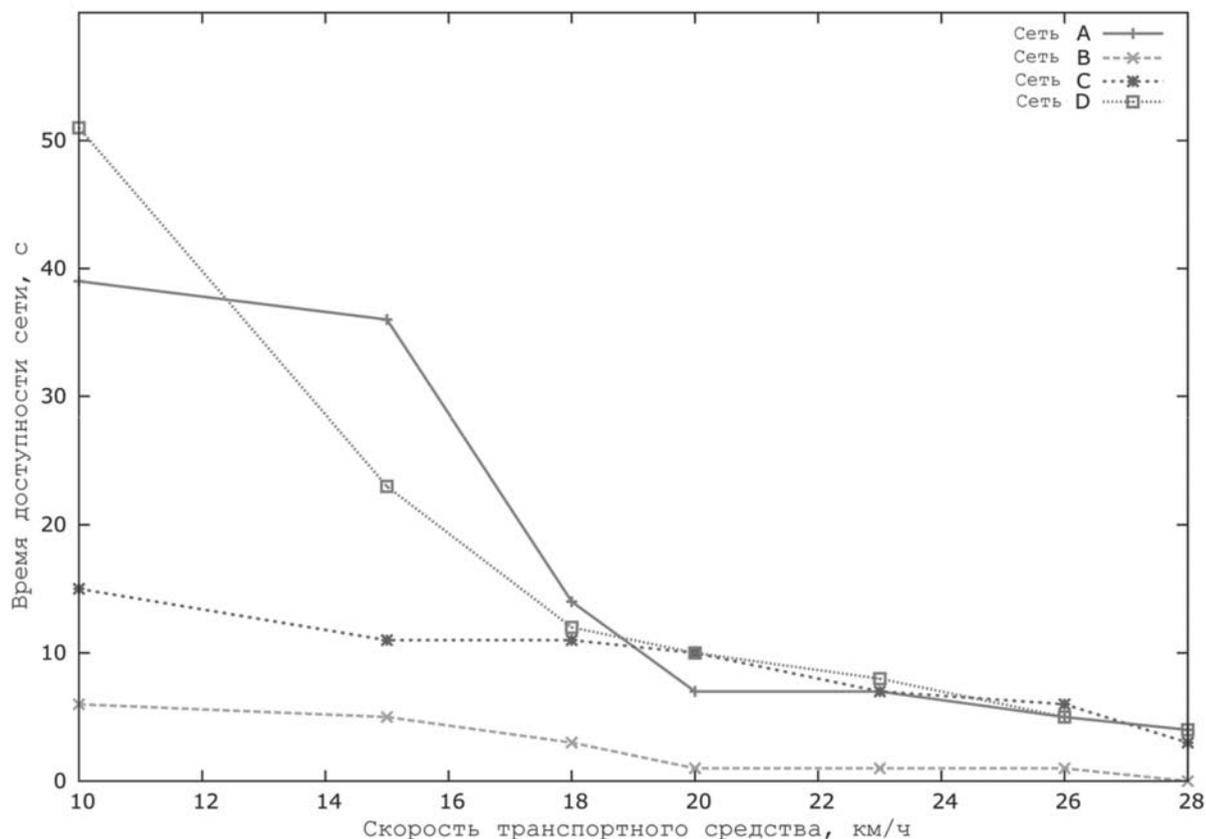


Рис. 9. График зависимости времени видимости беспроводной локальной сети от средней скорости движения транспортного средства

мости числа зарегистрированных сетей и объемов передаваемых данных от средней скорости движения транспортного средства. Как видно из графика, число зарегистрированных стационарных беспроводных сетей уменьшается с ростом средней скорости, что вызвано снижением относительной частоты опроса на единицу пути.

Объем передаваемых данных монотонно снижается с ростом средней скорости ввиду как уменьшения числа зарегистрированных сетей, так и уменьшения числа опросов сети, вызванного снижением времени движения по траектории, что позволяет сделать вывод об эффективности работы мультипротокольного узла в режиме регистрации уровня сигнала локальной и глобальной беспроводной сети.

На рис. 9 приведена зависимость времени видимости стационарной беспроводной сети мультипротокольным узлом транс-

портного средства от средней скорости движения для четырех типичных сетей. Из графика видно, что при любых достигнутых средних скоростях движения транспортного средства радиус доступности сетей снижается не более чем на 35 %, что позволяет надежно обеспечить их регистрацию техническими средствами мультипротокольного узла.

Для демонстрации эффективности получения данных от сервиса телематической карты проведена серия экспериментов по запросу данных о стационарных беспроводных сетях у сервиса телематической карты и сравнению результатов с фактической радиообстановкой.

На рис. 10 приведены результаты сравнения идентификаторов беспроводных сетей, полученных непосредственно на мультипротокольном узле и из базы данных облачного сервиса. Гистограмма демон-

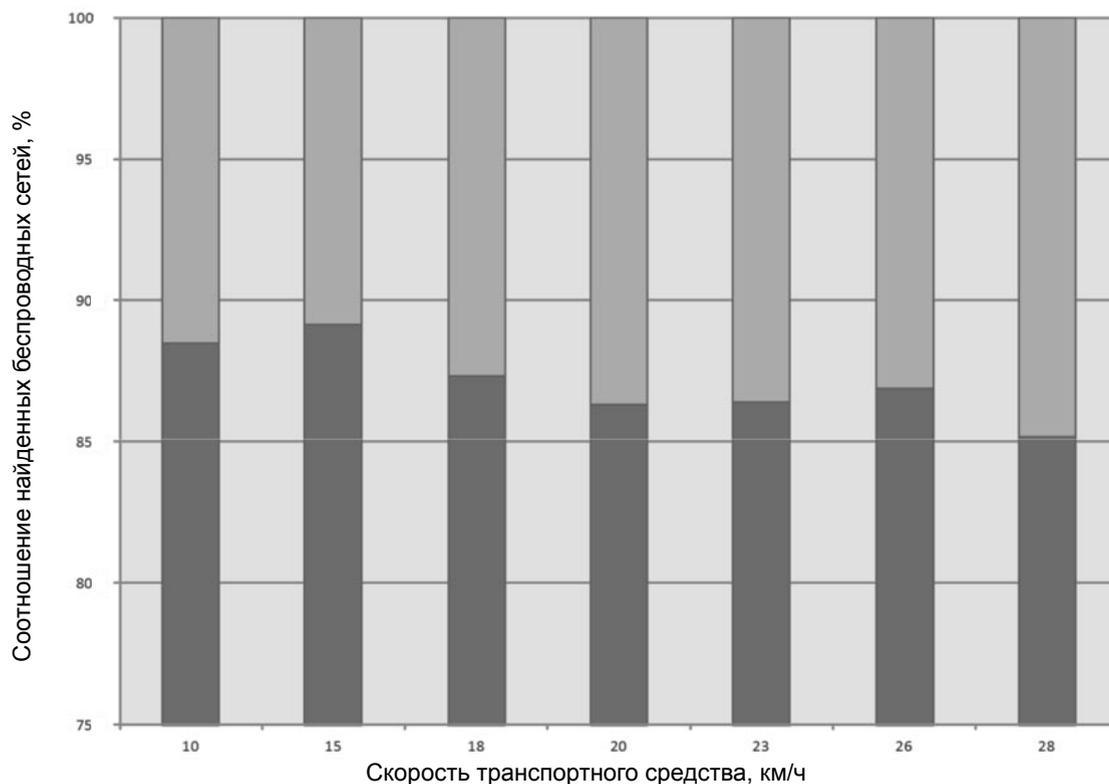


Рис. 10. Гистограмма распределения числа обнаруженных сетей (■) имена сетей совпали; (□) имена сетей не совпали

стрирует устойчивое совпадение перечня сетей, полученных из облачного сервиса и обнаруженных в эфире во время движения ТС, что позволяет сделать вывод о применимости технологии выбора перечня сетей из облачного телематического сервиса на всех скоростях движения транспортного средства.

Исследование зависимости уровня сигнала LTE выявило тенденцию к некоторому снижению соотношения сигнал-шум на более высоких скоростях, что, однако, не приводило к разрывам соединения или снижению скоростей обмена данными между мультипротокольным узлом и программно-аппаратной реализацией телематической карты.

Разработанная технология управления данными о доступных беспроводных сетях LTE и Wi-Fi из транспортного средства на всем пути движения обеспечивает сбор, предварительное хранение, периодическую

отправку данных о сетях, обобщение данных от многих транспортных средств, периодический запрос данных о доступных сетях в регионе. Информационная система позволяет поддерживать актуальное состояние о сетях в режимах как непосредственного подключения, так и при временном отсутствии связи с облачным сервисом.

Разработанная концепция представления данных о телематической обстановке для выделенных географических регионов с учетом сезонной и временной нагрузки на беспроводные сети позволяет минимизировать объем служебного трафика и повысить надежность соединения абонентов.

Приведенная в статье технология взаимодействия МПУ с телематической картой прошла успешную апробацию на аппаратно-программном стенде, что подтверждает работоспособность и возможность практической реализации данного подхода. Результаты экспериментов показывают техническую возможность анализа

радиообстановки из движущегося транспортного средства.

Дальнейшим продолжением работы является реализация пользовательских сервисов непрерывного доступа в Сеть путем пла-

нирования наилучших моментов и каналов передачи данных мультипротокольного узла.

Работа выполнена при поддержке гранта компании «Форд Моторс» и гранта РФФИ 13-07-12106.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Amin M., Bhuiyan M., Reaz M., Nasir S.** GPS and Map matching based vehicle accident detection system // Proc. 2013 IEEE Student Conf. on Research and Development. 2015. Pp. 520–523.

2. **Bitam S., Mellouk A.** ITS-cloud: Cloud Computing for Intelligent Transportation System // Global Communications Conf. 2012. Pp. 2054–2059.

3. **Zaborovskiy V., Lukashin A., Popov S., Vostrov A.** Adage mobile services for ITS infrastructure // ITS Telecommunications 13th Internat. Conf. on. 2013. Pp. 127–132.

4. **Li C., Han X., Sun Y.** Design of dynamic vehicle navigation terminal based on GPS/GPRS // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 472. Pp. 237–241.

5. **Sardis F., Mapp G., Loo J. et al.** On the Investigation of Cloud-Based Mobile Media Environments With Service-Populating and QoS-Aware Mechanisms // Multimedia, IEEE Transactions on. 2013. Vol. 15. No. 4. Pp. 769–777.

6. **Msadaa I.C., Cataldi P., Filali F.** A Comparative Study between 802.lip and Mobile WiMAX-based V2I Communication Networks // Proc. of the 2010 4th Internat. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010. Pp. 186–191.

7. **Popov S., Kurochkin M., Kurochkin L., Glazunov V.** Hardware and software equipment for

modeling of telematics components in intelligent transportation systems // Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8638 LNCS. Pp. 598–608.

8. **Gramaglia M., Bernardos C.J., Caldero'n M.** Seamless Internet 3G and Opportunistic WLAN Vehicular Connectivity // EURASIP J. Wireless Comm. and Networking. 2011. Pp. 183–183.

9. Media.ford.com. Adaptive Cruise Control and Collision Warning with Brake Support [Электронный ресурс] / URL: http://media.ford.com/images/10031/Adaptive_Cruise.pdf (Дата обращения 15.03.2013)

10. Media.ford.com. Ford Lane Keeping System Helps Fusion Drivers Stay Alert and Between the Lines [Электронный ресурс] / URL: http://media.ford.com/images/10031/Adaptive_Cruise.pdf (Дата обращения 15.03.2013)

11. Ford.co.uk. News from Ford. Ford's Sync Emergency Assistance could provide important support to road accident victims says AA president [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ford.co.uk/experience-ford/AboutFord/News/CompanyNews/2012/Fords-Syn's-c-Emergency-Assistance> (Дата обращения 15.03.2013)

12. **Cai M., Liang C, Chen W., Su H.** Realtime vehicle routes optimization by cloud computing in the principle of TCP/IP // Service Systems and Service Management 10th Internat. Conf. on. 2013. Pp. 113–118.

REFERENCES

1. **Amin M., Bhuiyan M., Reaz M., Nasir S.** GPS and Map matching based vehicle accident detection system, *Proceeding 2013 IEEE Student Conference on Research and Development*, 2015. Pp. 520–523.

2. **Bitam S., Mellouk A.** ITS-cloud: Cloud computing for Intelligent transportation system, *Global Communications Conference*, 2012, Pp. 2054–2059.

3. **Zaborovskiy V., Lukashin A., Popov S., Vostrov A.** Adage mobile services for ITS infrastructure, *ITS Telecommunications 13th International Conference*, 2013, Pp. 127–132.

4. **Li C., Han X., Sun Y.** Design of dynamic vehicle navigation terminal based on GPS/GPRS, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 472, Pp. 237–241.

5. **Sardis F., Mapp G., Loo J. et al.** On the

Investigation of Cloud-Based Mobile Media Environments with Service-Populating and QoS-Aware Mechanisms, *Multimedia, IEEE Transactions*, 2013, Vol. 15, No. 4, Pp. 769–777.

6. **Msadaa I.C., Cataldi P., Filali F.** A Comparative Study between 802.lip and Mobile WiMAX-based V2I Communication Networks, *Proceedings of the 4th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010, Pp. 186–191.

7. **Popov S., Kurochkin M., Kurochkin L., Glazunov V.** Hardware and software equipment for modeling of telematics components in intelligent transportation systems, *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, Vol. 8638 LNCS, Pp. 598–608.

8. **Gramaglia M., Bernardos C.J., Caldero'n M.**



Seamless Internet 3G and Opportunistic WLAN Vehicular Connectivity, *EURASIP J. Wireless Comm. and Networking*, 2011, Pp. 183–183.

9. *Media.ford.com. Adaptive Cruise Control and Collision Warning with Brake Support*. Available: http://media.ford.com/images/10031/Adaptive_Cruise.pdf (Accessed 15.03.2013)

10. *Media.ford.com. Ford Lane Keeping System Helps Fusion Drivers Stay Alert and Between the Lines*. Available: http://media.ford.com/images/10031/Adaptive_Cruise.pdf (Accessed 15.03.2013)

11. *Ford.co.uk. News from Ford. Ford's Sync Emergency Assistance could provide important support to road accident victims says AA president*. Available: <http://www.ford.co.uk/experience-ford/AboutFord/News/CompanyNews/2012/Fords-Sync-Emergency-Assistance> (Accessed 15.03.2013)

12. **Cai M., Liang C, Chen W., Su H.** Realtime vehicle routes optimization by cloud computing in the principle of TCP/IP, *Service Systems and Service Management, 10th International Conference on*, 2013, Pp. 113–118.

ГЛАЗУНОВ Вадим Валерьевич – аспирант кафедры телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

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

E-mail: neweagle@gmail.com

GLAZUNOV Vadim V. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: neweagle@gmail.com

КУРОЧКИН Михаил Александрович – профессор кафедры телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

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

E-mail: kurochkin.m@gmail.com

KUROCHKIN Mikhail A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: kurochkin.m@gmail.com

ПОПОВ Сергей Геннадьевич – доцент кафедры телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

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

E-mail: popovserge@spbstu.ru

POPOV Sergey G. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: popovserge@spbstu.ru

ВУ Чунминг – профессор Zhejiang University, PhD.

310027, Zheda Rd. 38, Hangzhou.

E-mail: wuchunming@zju.edu.cn

WU Chunming *Zhejiang university.*

38 Zheda Rd., Hangzhou, 310027.

E-mail: wuchunming@zju.edu.cn

ЛИУ Лейбо – профессор Tsinghua University, PhD.

100084, China, Beijing.

E-mail: liulb@tsinghua.edu.cn

LIU Leibo *Tsinghua University.*

Beijing, China, 100084.

E-mail: liulb@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.3

УДК 004.415

Л.Ю. Лабошин, А.А. Лукашин, В.С. Заборовский

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ MAPREDUCE ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИОННЫМ РЕСУРСАМ В КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЯХ

L.Yu. Laboshin, A.A. Lukashin, V.S. Zaborovsky

APPLYING MAPREDUCE AND NETWORK TRAFFIC ANALYSIS TO CONTROL ACCESS TO INFORMATION RESOURCES

Обработка информации в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач. С ростом и развитием информационных и телекоммуникационных технологий выросли и объемы передаваемой информации по сети Интернет. Одновременно с обработкой информации встает вопрос ее защиты.

Предложен подход к построению распределенной вычислительной системы, осуществляющей обработку снимков сетевого трафика за приемлемое время и обеспечивающей близкий к линейному рост производительности при наращивании вычислительных мощностей.

АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТРАФИКА; БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ; MAPREDUCE; HADOOP.

Nowadays information security is an important issue. Network traffic analysis is widely used by Internet Service Providers to evaluate network performance, to collect statistics and to detect vulnerabilities. To analyze traffic traces collected from a large network it is required a computer system where both storage and computing resources can be easily scaled out to handle and process multi-Terabyte files. Cloud computing platforms and cluster file systems could provide resizable compute and storage capacity. The MapReduce programming model developed by Google in 2004 allows processing huge amounts of data in distributed manner by defining the map and reduce functions. The given paper proposes a cloud-computing framework based on a MapReduce approach for fast internet traffic analytics.

DEEP PACKET INSPECTION; BIGDATA; MAPREDUCE; HADOOP.

Обработка информации – одна из наиболее актуальных задач. С лавинообразным ростом и развитием информационных и телекоммуникационных технологий увеличиваются и объемы передаваемой информации по сети Интернет. Одновременно с обработкой информации встает вопрос ее защиты [1]. Информационная безопасность современных вычислительных систем является одной из приоритетных задач, сформулированных правительством РФ. В соответствии с приказом Минкомсвязи, который обязует интернет-провайдеров предоставлять снимки сетевого трафика за последние 12 часов с 1 июня 2014 г., важность оперативной обработки таких снимков является неоспоримой. В связи с вышесказанным, оперативный анализ и обработка сетевого

трафика – очень важная и актуальная проблема, требующая решения.

Задача обработки сверхбольших снимков трафика относится к задачам класса «больших данных». При пропускной способности сетевого канала в 10 Гбит/с за 12 ч будет передано в одну сторону более 50 ТБ информации. Как правило, магистральный провайдер располагает каналами в сотни гигабит. Но уже при десятигигабитном канале требуется обработка порядка сотни терабайт. Обработка такого объема информации относится к задаче больших данных и не может быть произведена одним сервером за приемлемое время.

Предлагаемым в данной статье решением проблемы является организация об-

лачной среды, вычислительные ресурсы которой могут масштабироваться до тысяч виртуальных серверов, и создание на ее базе распределенной вычислительной системы, осуществляющей обработку снимков сетевого трафика за приемлемое время и обеспечивающей близкий к линейному рост производительности при наращивании вычислительных мощностей.

Перспективный путь повышения эффективности использования вычислительных ресурсов и уменьшения времени решения задач обработки больших данных – совместное применение технологий облачных вычислений, гибридных вычислительных архитектур и функциональных средств программирования.

Применение модели MapReduce в задачах анализа сетевого трафика

Существует большое количество инструментов, таких как, например, анализатор сетевых протоколов Wireshark и CoralReef, позволяющих производить мониторинг и анализ сетевого трафика. Однако большинство таких инструментов ориентировано на использование на одном высокопроизводительном сервере, что делает невозможным их использование для обработки больших объемов трафика, полученных на высокоскоростных каналах связи. Yeonhee Lee [8, 9] предложена система анализа сетевого трафика на базе Apache Hadoop, ограниченная только сбором статистической информации. Библиотека RIPE не использует возможности параллельного чтения и записи в распределенную файловую систему, что серьезно сказывается на общей производительности системы.

Модель обработки данных MapReduce, разработанная компанией Google в 2004 г., позволяет параллельно обрабатывать данные большого объема путем задания функций Map и Reduce [2]. Вычислительные элементы, реализующие эти функции, называются, соответственно, маппер (mapper) и редьюсер (reducer). Одновременно над одной задачей может работать большое количество мапперов и редьюсеров, распределенных по узлам кластера. Данные для обработки с помощью MapReduce должны

быть представлены в формате ключ – значение $\langle k; v \rangle$.

Весь объем входных данных разбивается на фрагменты определенного размера или блоки, каждый такой блок поступает на вход одному из мапперов. Входящая пара $\langle k_{in}; v_{in} \rangle$ преобразуется в промежуточную пару $\langle k_{int}; v_{int} \rangle$. Затем промежуточные данные, полученные со всех мапперов, группируются по ключу k_{int} и поступают на вход редьюсерам в виде $\langle k_{int}; list v_{int}^i \rangle$. Таким образом, значения, соответствующие одному ключу, попадают в один редьюсер. После окончательной обработки на выходе редьюсера получаем пары $\langle k_{out}; v_{out} \rangle$, которые записываются в выходной файл. Схематично работа MapReduce-задачи представлена на рис. 1.

В современных системах обработки больших данных, таких как Apache Hadoop, хранение обрабатываемых данных осуществляется в распределенных файловых системах, например, Hadoop File System (HDFS). При этом обеспечивается очень важный принцип локальности обработки данных: процессы mapper и reducer запускаются на тех узлах кластера, где находятся обрабатываемые данные, что сокращает время доступа к распределенному хранилищу.

Предлагаемым путем решения задачи параллельного анализа сетевого трафика в распределенной облачной среде является применение парадигмы MapReduce совместно с функциональными технологиями программирования, основанными на неизменяемых структурах данных, что позволяет распараллелить обработку информации без блокировок и операций синхронизации.

Для анализа снимка сетевого трафика

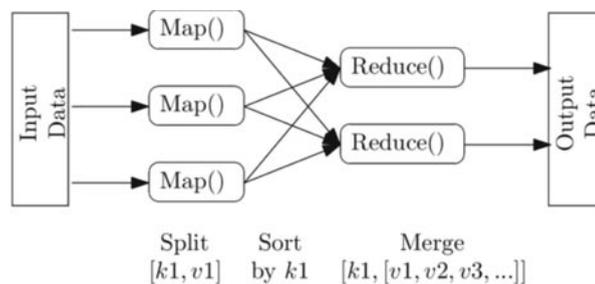


Рис. 1. Функции Map и Reduce

необходимо перенести файлы с трафиком в параллельную файловую систему и запустить операции Map/Reduce. При этом масштабирование скорости обработки снимка будет реализовано за счет наращивания количества узлов кластера.

Производительность каждой отдельно взятой задачи зависит от характеристик кластера, на котором она выполняется. Распределение задач между ядрами CPU или вычислителями на базе GPU представляется нетривиальной задачей. Масштабируемая платформа анализа данных Spark, которая включает в себя примитивы для вычислений в оперативной памяти и, следовательно, обладает некоторыми преимуществами в части производительности по отношению к подходу Hadoop, основанному на кластерной схеме хранения данных [7]. Spark реализован на мультипарадигменном языке программирования Scala и поддерживает этот язык, который обеспечивает уникальную среду для обработки данных.

Методика обработки снимков сетевого трафика для полного анализа передаваемых данных

Существует множество форматов для сохранения снимков сетевого трафика, однако одним из самых распространенных форматов является PCAP (Packet CAPture) [3]. Библиотека libpcap является платформонезависимой библиотекой с открытым исходным кодом (версия для Windows носит название winpcap). PCAP используется в качестве основного формата такими программными средствами, как tcpdump, Wireshark, nmap, и является де-факто стандартом для захвата и анализа сетевых пакетов данных. Libpcap – двоичный файл, состоящий из глобального заголовка, позволяющего его идентифицировать, и записей для каждого захваченного пакета (рис. 2). Для хранения и анализа трафика в разрабатываемой системе было решено использовать формат libpcap.

Программы, построенные на программ-

ной модели MapReduce, в большинстве своем используются для обработки больших объемов текстовых файлов, таких как лог-файлы или веб-страницы, поэтому основной формат входных файлов текстовый. Каждая строка интерпретируется как пара $\langle k_{in}; v_{in} \rangle$: ключ – это смещение от начала файла, значение – содержимое строки. Двоичный формат PCAP не имеет отметок между пакетами, таких как символ перевода строки в текстовых документах. Так как исходный файл разделяется на блоки фиксированной длины, пакетная запись в файле часто находится в двух соседних блоках. Длина записи также варьируется от пакета к пакету, что осложняет их выявление в пределах блока распределенной файловой системы. Следовательно, для корректной работы системы (рис. 3) необходимо разработать надежный алгоритм определения начала пакетной записи в блоке.

Размер кадра в сети Ethernet обычно находится в диапазоне 64–1518 байт (за исключением Jumbo фреймов, размер которых может достигать нескольких килобайт). В заголовке пакетной записи PCAP файла присутствуют два двухбайтовых поля: первое содержит длину пакетной записи, второе – длину пакета в сети. При стандартных настройках захвата сетевого трафика максимальная длина пакетной записи 65 535 байт, и длина пакета в сети никогда не превышает этого значения. Следовательно, в соответствующих полях пакетной записи будут находиться равные значения.

В данной статье предложен эвристический алгоритм, в котором эта особенность используется как своеобразная метка начала пакетной записи. Обработка блока входных данных начинается с поиска двух равных, идущих подряд, двухбайтовых полей, содержащих значение, соответствующее допустимому размеру кадра в сети Ethernet. Когда такие поля найдены, определяется предполагаемое место начала пакетной записи и производится дополнительная проверка его корректности, например, путем сравнения



Рис. 2. Структура файла PCAP



Рис. 3. Процедура обработки блока файловой системы

поля Ethertype с допустимыми значениями (IEEE 802.3) [4]. Подобная проверка выполняется для каждой обнаруженной пакетной записи, что исключает ложное обнаружение начала кадра. После определения первой пакетной записи поиск следующей осуществляется схожим образом с того места, где закончилась предыдущая (рис. 4).

Разработанный алгоритм дает возможность разбить снимок сетевого трафика на блоки, которые содержат только полные сессии (TCP и UDP), что позволяет осуществить анализ всего контекста сетевого соединения.

Предложенный подход позволяет решить задачи, которые можно разбить на

два класса.

1. Анализ статистических данных сетевого трафика на базе MapReduce. Используя описанный выше метод чтения пакетных записей в пределах блока с помощью задания простых функций подсчета, становится возможным извлечение статистической информации из файла снимка сетевого трафика, вплоть до транспортного уровня модели OSI. Результаты анализа на данном уровне предоставляют следующую информацию:

• общее количество трафика между отдельными подсетями (байтов, пакетов, соединений);

• общее количество локального трафика; выявление трафика, нарушающего политику доступа.

Предложенный подход позволяет решить следующие практические задачи:

• выявление наличия вирусного трафика в сети (аномально большое количество входящего и исходящего трафика);

• выявление DDoS атак (аномально большое количество трафика, сгенерированного почтовыми или DNS серверами);

• доступ к запрещенным IP адресам.

2. Полный анализ содержимого сетевого трафика. Полный анализ пакетов сетевого трафика (deep packet inspection) позволяет сопоставлять поток трафика с базой известных паттернов, известных как сигнатуры. Сигнатуры являются представлением потенциально вредоносного содержимого в виде строки символов или определенной последовательности байтов. В отличие от рассмотренных выше задач подсчета, которые могут быть выполнены на IP уровне, такой анализ не может быть проведен для отдельно взятого блока в файловой системе, а требует построения отдельных потоков данных, формируемых сетевыми приложениями в рамках информационного взаимодействия. Такие потоки, называемые *виртуальными соединениями*, как некоторая абстракция, существуют параллельно друг от друга, при этом не имеют между собой разделяемых ресурсов, что позволяет осуществлять их параллельную обработку [5].

Для построения виртуального соединения, при обработке каждого блока с помощью таргет для каждого пакета задается

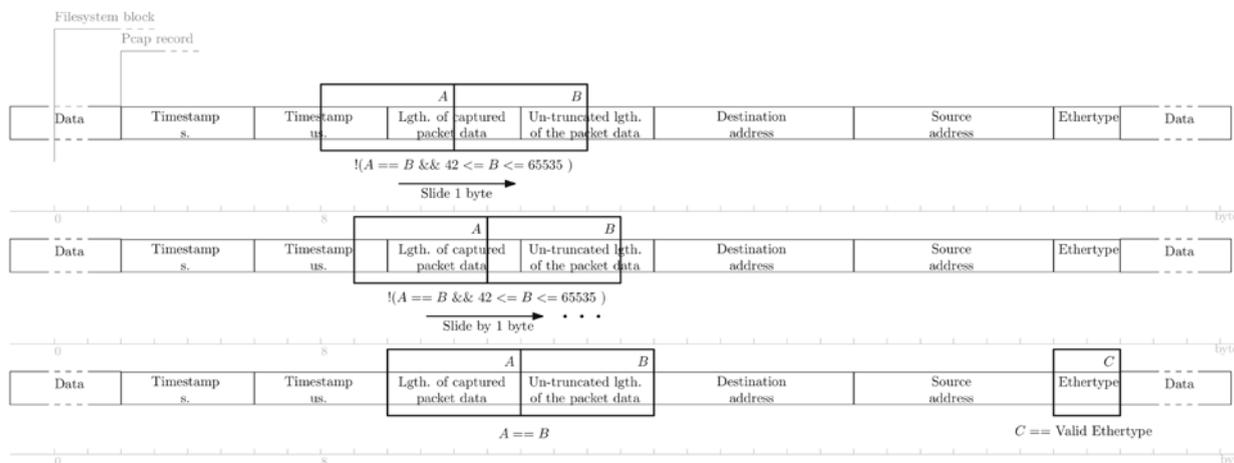


Рис. 4. Алгоритм выявления начала пакетной записи в блоке распределенной файловой системы

ключ, построенный на основании некоторой коммутативной операции над хешами адресами отправителя и получателя, такой что $F(src, dst, port) == F(dst, src, port)$. На основании значения этого ключа на стадии reduce собирается выходной файл, содержащий в себе одно независимое виртуальное соединение. Над такими файлами может быть произведен детальный анализ соответствующего протокола, например, заголовков и содержимого HTTP – трафика.

Архитектура системы анализа сетевого трафика в магистральных сетях

Предлагаемый в статье подход можно применить для анализа сетевого трафика в магистральных сетях крупных провайдеров. Нами были разработаны следующие требования к системе анализа трафика:

- индексация трафика, сгенерированного сетью за 30 мин, должна занимать 15–20 мин работы кластера (время обработки может быть уменьшено за счет масштабирования системы);
- время поиска по проиндексированным данным суточного трафика за 5–30 мин в зависимости от типа поискового запроса;
- оперативное хранилище сетевого трафика за последние 12 ч с емкостью от 150 ТБ;
- возможность подключения долговременного хранилища для сохраненных снимков сетевого трафика.

Для реализации разработанных требований необходимо осуществлять оперативную

индексацию данных и ведение учета обработанных снимков в локальной базе данных. Кроме того, система должна предусматривать очистку хранилища, если в снимках не было найдено важной информации. Структура системы представлена на рис. 5.

Трафик поступает с сетевого оборудования (например, за счет зеркалирования трафика в коммутаторах) в подсистему загрузки снимков в хранилище, которая аккумулирует данные за временное окно и загружает файл на обработку и хранение в параллельную файловую систему. Кластер Map/Reduce осуществляет анализ и индексацию содержимого сетевого трафика. Управление системой осуществляется через веб-интерфейс, предоставляющий возможность администрирования комплекса (в т. ч. масштабирования), задания поисковых запросов и визуализации результатов поиска.

Необходимо отметить, что существуют системы для обработки больших данных, поставляемые компаниями IBM и Teradata. Однако стоимость таких систем высока, для анализа трафика требуется их значительная доработка. Рассматриваемая в статье система имеет следующие преимущества перед существующими аналогами:

- масштабирование производительности и объема хранилища путем простого добавления серверов в кластер;
- применение открытых программных разработок;
- возможность установки на разные ап-

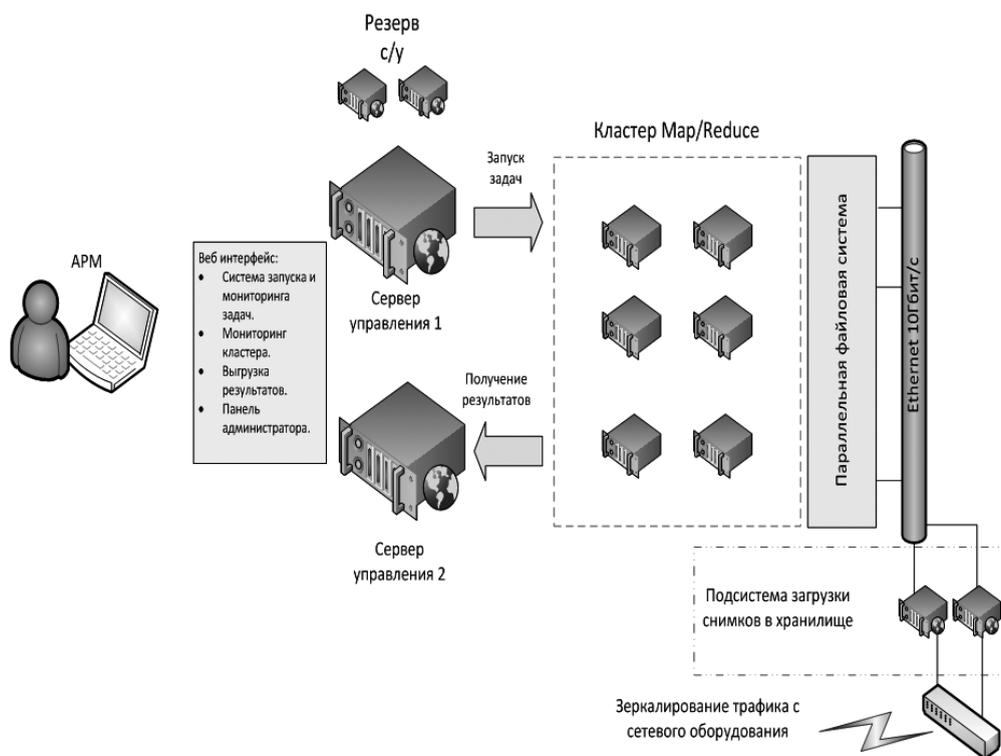


Рис. 5. Структура системы распределенного анализа снимков сетевого трафика

паратные платформы, что позволяет обеспечить использование сертифицированного оборудования без «закладок»;

- более низкая стоимость комплекса, даже с учетом затрат на разработку ПО.

Для масштабирования производительности системы анализа снимков сетевого трафика применяется облачная платформа типа инфраструктуры как сервис «Пилигрим» [6].

В статье предложен подход к анализу снимков сетевого трафика, основанный на парадигме MapReduce. В отличие от существующих решений, предполагающих производство операций анализа на одном

высокопроизводительном сервере, такой подход позволяет обеспечить автоматическое распараллеливание и хранение данных на внутренних дисках узлов кластера и может использоваться для построения вычислительной платформы, ресурсы которой могут масштабироваться в зависимости от объема входных данных для обработки сверхбольших файлов архивов сетевого трафика современных вычислительных сетей. Распределенная файловая система позволяет хранить данные большого объема на дисках серверов стандартной архитектуры, без необходимости установки дорогостоящей системы хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов Н.Н. Форензика — компьютерная криминалистика. М.: Юридический мир, 2007. С. 37–50.
2. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: simplified data processing on large clusters //Communications of the ACM. 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 107–113.
3. Garcia L.M. Tcpdump and Libpcap [Электронный ресурс]/ URL: <http://www.tcpdump.org/> (Дата обращения 26.08.2010).

4. Eastlake D., Romascanu D. IANA IEEE 802 Numbers [Электронный ресурс]/ URL: <http://www.iana.org/assignments/ieee-802-numbers/ieee-802-numbers.xhtml/> (Дата обращения 26.08.2010).
5. Заборовский В.С. и др. Архитектура системы разграничения доступа к ресурсам гетерогенной вычислительной среды на основе контроля виртуальных соединений //Вестник

УГАТУ. 2013. Т. 15. № 5(45). С. 170–174.

6. **Заборовский В., Лукашин А.** Высокопроизводительная защищенная облачная среда // Открытые системы. СУБД. 2013. № 6. С. 10–13. [Электронный ресурс]/ URL: <http://www.osp.ru/os/2013/06/13036845> (Дата обращения 12.11.2014).

7. **Kumawat T., Sharma P.K., Verma D., Joshi K., Kumawat V.** Implementation of spark cluster technique

with scala // International Journal of Scientific and Research Publications. 2012. No. 2(11).

8. **Lee Y., Kang W., Lee Y.** A hadoop-based packet trace processing tool // In TMA. 2011. Pp. 51–63.

9. **Lee Y., Lee Y.** Toward scalable internet traffic measurement and analysis with Hadoop // Computer Communication Review. 2013. No. 43(1). Pp. 5–13.

REFERENCES

1. **Fedotov N.N.** *Forenzika – kompyuternaya kriminalistika [Forensic Computer Forensics]*. Moscow: Yuridicheskiy mir Publ., 2007, Pp. 37–50. (rus)

2. **Dean J., Ghemawat S.** MapReduce: simplified data processing on large clusters, *Communications of the ACM*, 2008, Vol. 51, No. 1, Pp. 107–113.

3. **Garcia L.M.** *Tcpdump and Libpcap*. Available: <http://www.tcpdump.org/> (Accessed 26.08.2010).

4. **Eastlake D., Romascanu D.** *IANA IEEE 802 Numbers*. Available: <http://www.iana.org/assignments/ieee-802-numbers/ieee-802-numbers.xhtml/> (Accessed 26.08.2010).

5. **Zaborovskiy V.S. et al.** Архитектура системы разграничения доступа к ресурсам гетерогенной вычислительной среды на основе контроля virtualnykh soyedineniy [The system architecture is restricting access to the resources of a heterogeneous computing environment based on the control of virtual

connections]. *Vestnik UGATU [Herald UGATU]*, 2013, Vol. 15, No. 5 (45), Pp. 170–174. (rus)

6. **Zaborovskiy V., Lukashin A.** Vysokoproizvoditelnaya zashchishchennaya oblachnaya sreda [High secure Cloud], *Otkrytyye sistemy. SUBD [Open Systems. DBMS]*, 2013, No. 6, Pp. 10–13. Available: <http://www.osp.ru/os/2013/06/13036845> (Accessed 12.11.2014). (rus)

7. **Kumawat T., Sharma P.K., Verma D., Joshi K., Kumawat V.** Implementation of spark cluster technique with scala, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, No. 2(11).

8. **Lee Y., Kang W., Lee Y.** A hadoop-based packet trace processing tool, *In TMA*, 2011, Pp. 51–63.

9. **Lee Y., Lee Y.** Toward scalable internet traffic measurement and analysis with hadoop, *Computer Communication Review*, 2013, No. 43(1), Pp. 5–13.

ЛАБОШИН Леонид Юрьевич – аспирант кафедры телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

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

E-mail: laboshinl@neva.ru

LABOSHIN Leonid Yu. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: laboshinl@neva.ru

ЛУКАШИН Алексей Андреевич – доцент кафедры телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

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

E-mail: lukash.spb.ru@gmail.com

LUKASHIN Alexey A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: lukash.spb.ru@gmail.com

ЗАБОРОВСКИЙ Владимир Сергеевич – заведующий кафедрой телематики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

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

E-mail: vlad@neva.ru

ZABOROVSKY Vladimir S. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

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

E-mail: vlad@neva.ru



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.4

УДК 519.652

А.С. Ильин

АЛГОРИТМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ВОЗРАСТАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ СПЛАЙНАМИ

A.S. Ilyin

INTERPOLATION ALGORITHM FOR AN INCREASING FUNCTION BY EXPONENTIAL SPLINES

Представлены формулы вычисления параметров экспоненциальных и логарифмических базовых функций для интерполяции возрастающей функции, заданной таблицей. Рассмотрены случаи равномерных и неравномерных шагов аргумента. Главная цель – предотвращение интерполяционных выпуклостей, поэтому стыковка производных вытеснена на второстепенные позиции. Предложено рассматривать скачки производной как факторы качества исходных данных при визуальном контроле. На тестовом примере проведено сравнение двух вариантов склеивания базовых функций и обсужден вопрос сохраняемости формы. Представлен пример обработки экспериментальных градуировочных данных.

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ; ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЕ СПЛАЙНЫ; ГРАДУИРОВОЧНАЯ ФУНКЦИЯ; СОХРАНЯЕМОСТЬ ФОРМЫ.

The paper presents formulas for calculating the parameters of exponential and logarithmic basic functions for the interpolation of the increasing function set by the table. Cases with even and odd numbers of argument steps are considered. The main goal was to prevent interpolation convexity, so the joining of derivatives was relegated to minor positions. It has been suggested that jumps in a derivative should be regarded as quality factors for basic data when visual examination is performed. The test case involved comparing two variants of pasting basic functions and discussing the issue of form-keeping. An example of processing experimental calibration data is demonstrated. The procedure is presented in the Pascal language.

INTERPOLATION; EXPONENTIAL SPLINES; CALIBRATION FUNCTION; FORM-KEEPING.

Актуальность предлагаемого алгоритма обусловлена тем, что интерполяция требуется повсеместно при обработке экспериментальных данных. Весьма важной областью применения интерполяции является и робототехника, прежде всего по части разработки сенсорных устройств [1]. Обработка сигналов от датчиков обычно происходит с применением градуировочных функций,

определяющих зависимость электрического сигнала от измеряемых физических величин внешнего пространства. Например, мы измеряем интенсивность гамма-излучения, которое зависит от типа и объема материала, от плотности или концентрации содержащихся веществ. В этих и во многих других случаях имеющиеся теоретические формулы обычно нуждаются в эксперимен-

тальных проверках и поправках. Именно экспериментальные данные обычно применяются в качестве эталонных. В ряде случаев они формируются на основе измерений на заготовленном наборе образцов (в пределах десятка). Поэтому на ограниченном количестве строк табличных данных возникает задача построения интерполяционной функции; при этом следует контролировать ее качество, т. е. выявлять общую закономерность (норму) и отклонение от нормы, чтобы при необходимости повторить изготовление образцов либо принять решение о том, что вместо интерполяции надо выполнить сглаживание, например, методом наименьших квадратов.

При разработке новых сенсорных систем для расширяющихся областей применения часто случается, что в условиях кооперации и распределения полномочий между специалистами разного профиля формирование градуировочных зависимостей происходит без участия разработчиков настраиваемой контрольно-измерительной аппаратуры, по отношению к которым экспериментаторы являются пользователями или заказчиками. Поэтому актуальна интеллектуализация предоставляемых программно-аппаратных средств, в данном случае и по части формирования градуировочных зависимостей. Пользователям должны быть предоставлены удобные средства для работы, включая индикацию понятных и исчерпывающих сведений о качестве исходных и формируемых данных.

Известно, что для обработки экспериментальных данных выбор метода аппроксимации (интерполяции) целесообразно осуществлять с учетом условий, характерных для данного анализируемого эксперимента: характер изменения данных, количество точек, точность измерения.

Для градуировочных функций типично, что природа нам предоставляет монотонно возрастающие зависимости: $y(x_i) < y(x_{i+1})$ при $x_i < x_{i+1}$.

Однако возрастание может быть неравномерным и переходящим в асимптотическое приближение к некоторому предельному уровню. Если на таких участках получены редкие исходные данные, то

обычные способы построения интерполяционной кривой с помощью полиномов дадут неверную картину с выпуклостями. Предостережения об этом эффекте имеются, например, в [2, с. 409] и в [3].

В связи с этим заслуживают внимание экспоненты. Известно [4], что поиск параметров интерполяционной функции в виде суммы экспонент является задачей сложной из-за нелинейности экспонент, даже не всегда имеющей решение. Считается, что построение суммы экспонент целесообразно в тех случаях, когда происхождение исходной таблично заданной функции имеет экспоненциальную природу, как, например, результаты измерений интенсивности излучения смеси радиоактивных материалов.

Поэтому мы приходим к необходимости использовать кусочно-экспоненциальные комбинации. Традиционно они называются *сплайнами*.

Например, в [5] рассматриваются «экспоненциальные гистосплайны».

На основе экспоненты представляются функции синус и косинус – гиперболические и тригонометрические. Такого рода обобщения называются *экспоненциальными L-сплайнами* [6, 7] и предлагаются для самого широкого использования. Однако проработанные теоретические основы оказываются весьма далекими от практического внедрения. Тем самым подтверждаются слова, написанные в [8, с. 44] именно по теме аппроксимации: «Общие формулы, рассчитанные на все случаи жизни, нередко оказываются настолько сложными, что их не применяют ни в одном конкретном случае». Там же [8, с. 44] далее отмечен факт, постоянно получающий практическое подтверждение: «Трудоёмкость же вычислений часто оказывается существенно меньшей при применении рекуррентных процедур».

Поэтому для практической деятельности по части формирования градуировочных зависимостей сенсорных устройств возникла необходимость выполнить интерполяцию экспонентами, хоть и не по обобщенной методике, но в значительной мере универсальной, ограничиваемой лишь условием монотонности возрастания (или убывания) требуемой функции.

Построение экспоненты по трем произвольным точкам. Искомую экспоненциальную функцию запишем в виде $y = C + B \exp(Ax)$.

Для вычисления трех параметров запишем систему трех уравнений на трех точках:

$$\begin{aligned} y_1 &= C + B \exp(Ax_1); \\ y_2 &= C + B \exp(Ax_2); \\ y_3 &= C + B \exp(Ax_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Разумеется, надо предварительно проверить неравенство отношений $(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$ и $(y_3 - y_1)/(x_3 - x_1)$, чтобы предотвратить попытки строить экспоненту по прямой линии.

Исключаем параметр C :

$$\begin{aligned} y_1 - y_2 &= B(\exp(Ax_1) - \exp(Ax_2)); \\ y_3 - y_2 &= B(\exp(Ax_3) - \exp(Ax_2)). \end{aligned} \quad (2)$$

Исключаем параметр B :

$$\begin{aligned} (y_3 - y_2)(1 - \exp(-A(x_2 - x_1))) &= \\ = (y_2 - y_1)(\exp(A(x_3 - x_2)) - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Полученное уравнение относительно A удобно записать в виде функции, приравняемой к нулю:

$$\begin{aligned} R(A) &= (y_2 - y_1)(\exp(A(x_3 - x_2)) - 1) + \\ &+ (y_3 - y_2)(\exp(-A(x_2 - x_1)) - 1) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Функция $R(A)$ имеет спад от минус-бесконечности и возрастание в плюс-бесконечность, а в отрицательную область плавно входит через точку $R(0) = 0$. Поэтому точка выхода из отрицательной области (искомое решение уравнения) находится приблизительно на таком же расстоянии от точки минимума A_{\min} , как и точка $R(0)$. Для поиска точки минимума запишем уравнение с первой производной:

$$\begin{aligned} R'(A) &= (y_2 - y_1)(x_3 - x_2) \exp(A(x_3 - x_2)) - \\ &- (y_3 - y_2)(x_2 - x_1) \exp(-A(x_2 - x_1)) = 0. \end{aligned}$$

Получаем решение:

$$A_{\min} = \frac{\ln \left(\frac{(y_3 - y_2)(x_2 - x_1)}{(y_2 - y_1)(x_3 - x_2)} \right)}{x_3 - x_1}. \quad (5)$$

Как видно, выражение под логарифмом

всегда положительное при условии монотонного возрастания исходных данных.

Удвоенное расстояние до точки минимума, являющееся приближенным решением уравнения (4), берем в качестве начального значения для итерационного процесса по методу касательных:

$$A_0 = 2A_{\min}; \quad R(A_0) + R'(A_0)\Delta A = 0;$$

$$\Delta A = -R(A_0) / R'(A_0); \quad A \leftarrow A_0 + \Delta A.$$

Всего лишь пять итерационных шагов оказываются достаточными, чтобы получить решение уравнения (4) с машинной точностью.

Далее обратными подстановками в (2) и (1) получаем значения параметров B и C .

Построение экспоненты на равномерных шагах аргумента. Рассмотрим часто встречающийся вариант, когда $x_3 - x_2 = x_2 - x_1$.

Для исключения параметров A и B применяем попарное деление уравнений (1), получаем уравнение, решаемое относительно параметра C :

$$\frac{y_2 - C}{y_1 - C} = \frac{y_3 - C}{y_2 - C}.$$

Получаем точное решение:

$$C = \frac{y_2^2 - y_1 y_3}{2y_2 - y_1 - y_3}.$$

Обозначив

$$r = \exp(A(x_3 - x_2)) = \exp(A(x_2 - x_1)),$$

запишем уравнение (3) в виде:

$$(y_3 - y_2)(1 - 1/r) = (y_2 - y_1)(r - 1).$$

Решение этого уравнения $r = (y_3 - y_2) / (y_2 - y_1)$ позволяет получить:

$$A = \frac{\ln \left(\frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1} \right)}{x_3 - x_2}. \quad (6)$$

Вычислив значения параметров A и C , получаем из (1) значение B с помощью любой из трех формул:

$$\begin{aligned} B &= (y_1 - C) \exp(-Ax_1) = \\ &= \frac{(y_2 - y_1)^2}{(y_3 - y_2) - (y_2 - y_1)} \exp(-Ax_1), \\ B &= (y_2 - C) \exp(-Ax_2) = \\ &= \frac{(y_3 - y_2)(y_2 - y_1)}{(y_3 - y_2) - (y_2 - y_1)} \exp(-Ax_2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$B = (y_3 - C) \exp(-Ax_3) = \frac{(y_3 - y_2)^2}{(y_3 - y_2) - (y_2 - y_1)} \exp(-Ax_3). \quad (7)$$

Формулы (1)–(7) запрограммированы в процедуре, представленной в приложении.

Аналогично можно построить функцию $x = c + b \exp(ay)$ по формулам (1)–(5), при этом везде поменять местами x и y .

Соответственно получаем логарифмическую функцию $y = \ln((x - c)/b)/a$.

Построение логарифмической функции на равномерных шагах аргумента. Рассмотрим также вариант $x_3 - x_2 = x_2 - x_1$ для логарифмической функции, хотя при этом получается решение итерационное, а не в виде точных аналитических формул.

Систему уравнений для этого варианта удобнее записать с экспонентами:

$$x_1 = c + b \exp(ay_1); \quad x_2 = c + b \exp(ay_2); \\ x_3 = c + b \exp(ay_3).$$

Вычитая первое из второго, второе из третьего, приравнявая шаги аргумента x , получаем:

$$\exp(ay_2) - \exp(ay_1) = \exp(ay_3) - \exp(ay_2).$$

После операции деления получаем:

$$\exp(a(y_3 - y_2)) + \exp(-a(y_2 - y_1)) = 2.$$

Если $y_3 - y_2 > y_2 - y_1$, то сделаем следующие обозначения:

$$p = \frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1}; \quad z = \exp(a(y_2 - y_1)).$$

Приходим к необходимости найти точку пересечения горизонтальной линии уровня два со следующей функцией:

$$h(z) = z^p + \frac{1}{z} = 2.$$

Кроме искомой точки пересечения, зависящей от параметра p , существует и постоянная точка пересечения при $z = 1$. Точка минимума функции $h(z)$ находится приблизительно посередине между двумя точками пересечения уровня два. Приравнявая производную к нулю, находим:

$$z_{\min} = \left(\frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p+1}}.$$

Отсчитывая удвоенное расстояние от точки $z = 1$, находим приближенное реше-

ние $z = 1 - 2(1 - z_{\min})$.

Для итерационного уточнения по методу касательных нетрудно получить формулу:

$$z \leftarrow z + \gamma \frac{2z^2 - z^{p+2} - z}{pz^{p+2} - 1}.$$

Эмпирически найдено подходящее значение $\gamma = 1, 4$.

Получаем значение параметра

$$a = \ln(z)/(y_2 - y_1).$$

Если $y_2 - y_1 > y_3 - y_2$, то обозначения сделаем иначе:

$$p = \frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_2}; \quad z = \exp(a(y_3 - y_2)).$$

Приходим к необходимости найти точку пересечения горизонтальной линии уровня два со следующей функцией:

$$h(z) = z + \frac{1}{z^p} = 2.$$

Находим точку минимума и отмеряем удвоенное расстояние:

$$z = 1 + 2(p^{\frac{1}{p+1}} - 1).$$

Аналогично строим итерационный процесс уточнения по методу касательных, получаем формулу:

$$z \leftarrow z + z \frac{2z^p - z^{p+1} - 1}{z^{p+1} - p}.$$

Оказывается, что такой пересчет достаточно выполнить три раза.

Получаем значение параметра

$$a = \ln(z)/(y_3 - y_2).$$

Далее вычисляем оставшиеся параметры требуемой функции:

$$b = \frac{x_2 - x_1}{\exp(ay_2) - \exp(ay_1)}; \quad c = x_1 - b \exp(ay_1).$$

Склеивание базовых функций. Имея набор функций, построенных на тройках заданных точек (в виде экспоненты, логарифма или прямой линии), приступаем к их склеиванию следующим образом:

пусть на точках $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$ построена функция $F_1(x)$;

пусть на точках $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ построена функция $F_2(x)$;

обратные функции обозначим маленькими буквами $f_1(y)$ и $f_2(y)$;



на интервале от x_1 до x_2 , который является общим для функций $F_1(x)$ и $F_2(x)$, формируем комбинацию по формуле $G_1(x) = U_1(x)F_1(x) + (1 - U_1(x))F_2(x)$;

аналогично на интервале от x_2 до x_3 формируем комбинацию

$$G_2(x) = U_2(x)F_2(x) + (1 - U_2(x))F_3(x);$$

и т. д.

Каждая склеивающая функция $U_k(x)$ на своем интервале от x_k до x_{k+1} должна удовлетворять условию $0 \leq U_k(x) \leq 1$. Иначе говоря, мы уверены, что истинная функция проходит где-то в зоне между $F_k(x)$ и $F_{k+1}(x)$.

Этот вариант склеивания путем суммирования вертикальной координаты y будем называть вертикальным.

Аналогичное склеивание обратных функций путем суммирования горизонтальной координаты x будем называть горизонтальным:

$$g_1(y) = u_1(y)f_1(y) + (1 - u_1(y))f_2(y),$$

$$g_2(y) = u_2(y)f_2(y) + (1 - u_2(y))f_3(y)$$

и т. д.

Будем называть правильным перекрестком в точке x_k ситуацию, когда обе разности $F'_{k-1}(x_k) - F'_k(x_k)$ и $F'_{k+1}(x_k) - F'_k(x_k)$ больше нуля (или обе меньше нуля).

В отличие от правильных перекрестков, будем называть x_k точкой прогиба, если при подходе к ней обе разности $F'_{k-1}(x_k) - F'_k(x_k)$ и $F'_{k+1}(x_k) - F'_k(x_k)$ больше нуля или обе меньше нуля. При этом разности $F'_{k-1}(x_k) - F'_k(x_k)$ и $F'_{k+1}(x_k) - F'_k(x_k)$ имеют разные знаки.

Варианты склеивания. Наиболее простым вариантом является усреднение:

$$H(x) = (F_1(x) + F_2(x)) / 2.$$

В этом случае гарантируется, что итоговая функция будет всегда возрастающая (или убывающая).

Непрерывность производной не соблюдается, но существует возможность регулировать изломы за счет выбора видов функций (экспонента или логарифм) и вариантов их склеивания (по горизонтали или по вертикали) в их комбинированных комбинациях.

Например, уместно минимизировать сумму абсолютных величин разностей углов наклона получающейся изломанной итоговой

линии в узловых точках, вычисляемую по формуле:

$$\sum_k abs(arctg(0,5(F'_{k-1}(x_k) + F'_k(x_k))) - arctg(0,5(F'_k(x_k) + F'_{k+1}(x_k))))).$$

При горизонтальном склеивании обратных функций вместо функции $arctg$ надо применять функцию $arctg$, разрывающуюся в нуле.

Заметим, что в точке прогиба x_k разность арктангенсов можно рассматривать как две независимые разности:

$$abs(arctg(0,5(F'_{k-1}(x_k) + F'_k(x_k))) - arctg(F'_k(x_k))),$$

$$abs(arctg(F'_k(x_k)) - arctg(0,5(F'_k(x_k) + F'_{k+1}(x_k)))).$$

Поэтому такая задача минимизации может быть разбита на независимые подзадачи, граничащие в точках прогиба.

Аналогично можно ставить задачу минимизации максимальной разности углов. Но в рамках данной статьи ограничиваемся рассмотрением наиболее простых решений, претендующих на широкое использование именно благодаря своей простоте.

Рассмотрим склеивание следующего вида:

$$G(x) = ((x_2 - x)F_1(x) + (x - x_1)F_2(x)) / (x_2 - x_1).$$

В этом варианте первая производная

$$G'(x) = (F_2(x) - F_1(x) + (x_2 - x)F'_1(x) + (x - x_1)F'_2(x)) / (x_2 - x_1)$$

обладает свойством непрерывности; при этом $G'(x_k) = F'_k(x_k)$.

Очевидно, что на правильных перекрестках итоговая производная $G'(x)$ претерпевает заведомое занижение (или завышение) по сравнению с истинной производной требуемой функции. Между тем именно правильные перекрестки имеются в тех случаях, когда заданные исходные данные возрастают (убывают) вполне гладко. Это типично для градуировочных функций.

Сравнение вариантов склеивания. Чтобы проверить, в какой мере получаемая кривая интерполяции адекватна истинной

кривой (сохраняемость формы), наиболее резонно и проще всего взять в качестве тестовой какую-нибудь аналитическую функцию, которая чем-то похожа на заданную табличную функцию, выполнить интерполяцию на заданном наборе точек, а затем с мелким шагом построить график или таблицу отклонений результата интерполяции от исходной тестовой функции.

Рассмотрим пример тестовой интерполяции функции $y(x) = \sqrt{x+1}$ на целочисленных точках аргумента. Результаты представлены в табл. 1. Как видно, оказалось, что вариант $H(x)$ обеспечивает приближение лучше, чем вариант $G(x)$. Непрерывность производной $G'(x)$ совсем не означает, что она более точно повторяет $y'(x)$.

$$A_1 = -0,1707; B_1 = -2,4019; C_1 = 3,439;$$

$$A_2 = -0,1266; B_2 = -2,9013; C_2 = 3,984.$$

Вариант $H(x)$ не гарантирует плавность первой производной, но именно это свойство является полезным для того, чтобы пользоваться весьма простым критерием качества результатов измерений, принимаемых в качестве исходных данных для интерполяции. Анализируя скачки первой производной, можно выражать экспертное мнение, считать ли исходные данные впол-

не адекватными действительности.

Пример экспоненциальной интерполяции.

Для экспериментальных данных, указанных в табл. 2, на рисунке представлены графики интерполяционной функции и ее производной (в масштабе, нормированном по максимуму первого графика). В связи с тем что форма зависимости имеет горизонтальную асимптоту, в качестве базовых функций применены экспоненты с вертикальным усреднением.

Как видно, имеющиеся скачки производной помогают обращать внимание пользователя на подозрительные участки кривой, для которых желательны уточнения исходных данных.

Пользователю предоставляется также возможность в интерактивном режиме вводить поправки (устранять горбы и провалы), наблюдать уточненные графики в сравнении с исходными.

Предлагаемая методика интерполяции в столь простом варианте удобна для практического программирования, обеспечивает адекватное построение градуировочных функций и контроль их качества. Использована на практике в области радиационных измерений.

Таблица 1

Сравнение двух вариантов интерполяции

x	$y(x)$	$y'(x)$	$(F_1'(x) - y'(x)) * 1000$	$(F_2'(x) - y'(x)) * 1000$	$(F_1(x) - y(x)) * 1000$	$(F_2(x) - y(x)) * 1000$	$(G(x) - y(x)) * 1000$	$(H(x) - y(x)) * 1000$
2,0	1,7321	0,2886	2,7998	-3,3961	0	0	0	0
2,1	1,7607	0,2839	2,5596	-2,2929	0,2691	-0,2829	0,2139	-0,0068
2,2	1,7889	0,2795	2,1811	-1,3664	0,5073	-0,4644	0,3129	0,0214
2,3	1,8166	0,2752	1,6798	-0,6000	0,7013	-0,5615	0,3224	0,0698
2,4	1,8439	0,2711	1,0696	0,0206	0,8396	-0,5893	0,2680	0,1251
2,5	1,8708	0,2672	0,36275	0,5088	0,9120	-0,5618	0,1751	0,1751
2,6	1,8974	0,2635	-0,4298	0,8763	0,9093	-0,4915	0,0687	0,2088
2,7	1,9235	0,2599	-1,2982	1,1336	0,8235	-0,3902	-0,0261	0,2166
2,8	1,9494	0,2564	-2,2338	1,2903	0,6474	-0,2682	-0,0850	0,1896
2,9	1,9748	0,2531	-3,2285	1,3551	0,3747	-0,1352	-0,0842	0,1197

Таблица 2

Исходные данные для интерполяции

0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,3	6,2	10,0
830	2310	3069	3533	3705	3817	3935	4046



Графики интерполяционной функции и ее производной

Приложение

Процедура вычисления параметров экспоненты

```
//Pascal- процедура вычисления параметров экспоненты
// y = C + B * exp (A*x)
function Exp_Interpol (var A: real; var B: real; var C: real;
  x1: real; x2: real; x3: real; // x1 < x2 < x3
  y1: real; y2: real; y3: real): integer;
var res, n: integer; f, ff, d, Amin, A0, dA, u, v, z, dif, r: real;
begin d:=0.00001;
  if not ((x1+d<x2) and (x2+d<x3) and (y1+d<y2) and (y2+d<y3)) then
    begin A:=0; B:=0; C:=0; res:=0; // нарушен порядок возрастания
    end else
  begin dif := (y3-y2) * (x2-x1) / ((y2-y1) * (x3-x2));
    if abs(dif-1) < d then
      begin // нужна линейная интерполяция
        A:=(y3-y1)/(x3-x1); B:= y1-A*x1; C:=0; res:=1;
      end else
    if x3+x1 = x2+x2 then
      begin // равномерный шаг аргумента
        z:=(2*y2 - y1 - y3); C := (y2*y2 - y1*y3) / z;
        r :=(y3-y2)/(y2-y1); A :=ln(r)/(x3-x2);
        B := (y1-C ) *exp(-A*x1); res:=2;
      end else
    begin Amin := ln(dif) / (x3-x1); A0 := 2 * Amin;
      n:=10; while n>0 do
        begin dec(n);
          u:=exp(A0*(x3-x2)); v:=exp(-A0*(x2-x1));
          F := (y2-y1)*(u-1)+ (y3-y2)*(v-1);
          FF := (y2-y1)*(x3-x2)*u - (y3-y2)*(x2-x1)*v;
          dA:=-F/FF; A0 := A0+dA;
```

```
if abs(dA/Amin) < 0.000000000000001 then break;  
end;  
A:=A0; B:=(y1-y2)/(exp(A0*x1)-exp(A0*x2));  
C:=y1-B*exp(A0*x1); res:=3;  
end; end; result:=res; end;
```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 100 с.
2. Дьяконов В.П. Mathcad 2001: спец. справочник. СПб.: Питер, 2002. 832 с.
3. Численные методы решения задач. Обработка экспериментальных данных средствами MathCAD [Электронный ресурс] / URL: <http://tib.znaimo.com.ua/docs/1100/index-26510-1.html> (Дата обращения 12.03.2015)
4. Утешев А.Ю. Интерполяция [Электронный ресурс] / URL: <http://pmpu.ru/vf4/interpolation> (Дата обращения 12.03.2015)
5. Винниченко Л.Ф. Экспоненциальные гистосплайны: предпосылки введения // Publishing house Education and Science s.r.o., конф. Европейская наука XXI века, 2009 [Электронный ресурс] / URL: http://www.rusnauka.com/14_ENXXI_2009/Matemathics/46070.doc.htm (Дата обращения 12.03.2015)
6. Стрелкова Е.В. Аппроксимация локальными L-сплайнами. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2009.
7. Шевалдина Е.В. Аппроксимация локальными экспоненциальными сплайнами с произвольными узлами // Сиб. журн. вычисл. матем. 2006. № 9:4. С. 391–402.
8. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 592 с.

REFERENCES

1. Yurevich Ye.I. *Sensornyye sistemy v robototekhnike* [Touch Systems in a Robotics]. St. Petersburg: Politekh. un-t Publ., 2013, 100 p. (rus)
2. Dyakonov V.P. *Mathcad 2001: special'nyj spravochnik* [Mathcad 2001: Special Reference Book]. St. Petersburg: Peter Publ., 2002, 832 p. (rus)
3. *Numerical methods of the solution of tasks. Processing of experimental data by means of MathCAD.* Available: <http://tib.znaimo.com.ua/docs/1100/index-26510-1.html> (Accessed 12.03.2015). (rus)
4. Uteshev A.Yu. Interpolation. Available: <http://pmpu.ru/vf4/interpolation> (Accessed 12.03.2015). (rus)
5. Vinnichenko L.F. Exponential gistosplines: introduction prerequisites, *Proc. of the Conf. Yevropeyskaya nauka XXI veka* [European science of the XXI century], 2009. Available: http://www.rusnauka.com/14_ENXXI_2009/Matemathics/46070.doc.htm (Accessed 12.03.2015). (rus)
6. Strelkova Ye.V. *Approksimatsiya lokalnymi L-splaynami. Diss. cand.* [Approximation by local L-splines. Abstr. cand. diss.]. Yekaterinburg: Institute of mathematics and mechanics Publ., 2009. (rus)
7. Shevaldina Ye.V. Approximation by local exponential splines with any knots, *Sib. zhurn. vychisl. matem.* [Siberian J. of calculus mathematics], 2006, No. 9:4, Pp.391–402. (rus)
8. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2013, 592 p. (rus)

ИЛЬИН Анатолий Степанович – старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики, кандидат технических наук.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.

E-mail: toly@rtc.ru

ILYIN Anatoliy S. State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC).

194064, Tikhoretsky Ave. 21, St.Petersburg, Russia.

E-mail: toly@rtc.ru



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.5

УДК 656, 004.8, 007.5, 51-74, 510.67

Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov

METHODS AND MODELS OF THE CONSTRUCTION OF TRANSPORT CORRESPONDENCE MATRIX

Проведен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций применительно к городским транспортным процессам, выявлены недостатки и достоинства последних. В результате анализа выбран реляционный метод построения матриц корреспонденций, а наиболее практически пригодной признана трилинейная модель (EVA) матриц корреспонденций. Работоспособность модели показана на примере оценки изменения распределения транспортных потоков в Санкт-Петербурге, вызванных вводом новых станций метрополитена «Обводный канал», «Адмиралтейская», «Бухарестская» и «Международная». Проанализированы результаты транспортного моделирования. Обозначены практические ориентиры развития моделей построения матриц корреспонденций.

МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ; ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; МЕТОД ЕДИНСТВЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА РОСТА; МЕТОД СРЕДНИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РОСТА; ДЕТРОЙТСКИЙ МЕТОД; МЕТОД ФРАТАРА; ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ; МОДЕЛЬ КОНКУРИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ; ТРИЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ.

We have analyzed the methods and models how to construct correspondence matrix for urban transport processes. We have also identified the advantages and disadvantages of the models. Having analyzed these models, we chose the relational method of the construction of correspondence matrix. The EVA model of the construction of correspondence matrix was recognized as the most suitable. The article demonstrates how the distribution of traffic flows in St. Petersburg is changed due to the fact that new metro stations such as “Obvodny Kanal”, “Admiralteyskaya”, “Bukharetskaya” and “Mezhdunarodnaya” have been put into operation. We have also outlined technical prospects of the models of the construction of correspondence matrix.

CORRESPONDENCE MATRIX; TRANSPORT MODELLING; SINGLE FACTOR GROWTH METHOD; AVERAGE GROWTH RATE; DETROIT METHOD; FRATARAR METHOD; GRAVITY MODEL; ENTROPY MODEL; COMPETING CENTERS MODEL; EVA MODEL.

Подходы к организации расселения населения в мегаполисах России с начала 2000 г. претерпевают значительные изменения [1]. В рыночных условиях хозяйствования, обусловленных интенсивным возведением жилой и коммерческой инфраструктуры, переносом предприятий и изменением мест приложения труда, изменяются объемы и направления транспортных корреспонденций. Построение матриц корреспонденций (МК) требует использования современных систем непрерывного транспортного мониторинга и применения современных методов для их восстановления и обновления.

Использование недостоверных данных, полученных посредством единичных опросов и локальных систем мониторинга транспортной мобильности, приводит к построению ложных транспортных моделей, сводит на нет эффективность принимаемых управленческих решений.

Таким образом, формирование МК является центральной и наиболее сложной задачей [2], с математической точки зрения во всех исследованиях, связанных с количественными, структурными и параметрическими изменениями транспортных потоков (ТП) в городской транспортной

системе (ГТС). Таковыми могут быть различные перемещения пассажиров, грузов или транспорта между любыми парами корреспондирующих пунктов транспортной сети с различными целями.

Анализ предметной области и постановка задачи. В настоящее время исследованиями проблем построения МК заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ отметим следующие: в [3] разработан алгоритм расчета матриц пассажирских корреспонденций пригородного сообщения на основании емкостей по отправлению и прибытию пассажиров на остановочные пункты; в [4] представлена методика определения сбалансированной емкости транспортных районов центральной части города по прибытию и отправлению автомобилей за счет включения в расчет количества автомобилей, осуществляющих движение по транспортной сети; в [5, 6] рассмотрены методы построения МК и алгоритмы калибровки; в [2] предложены методы робастного оценивания МК, сводящиеся к задачам линейного и квадратичного программирования со смешанными ограничениями; в [7, 8] описаны процедуры построения МК между районами отправления и прибытия с использованием информации, полученной от автоматизированных транспортных информационных системы; в [9–11] представлены алгоритмы статистической оценки и калибровки данных МК; в [12] рассмотрен подход классификации и упорядоченности социально-экономического поведения городского населения в границах информа-

ционных систем Федеральной службой государственной статистики.

Цель настоящей работы – проведение анализа существующих методов и моделей построения МК и выявление наиболее пригодных для оценки городских транспортных процессов и согласуемых с современными системами управления дорожным движением [13–16].

Анализ методов построения МК. При всем многообразии подходов к построению МК довольно четко прослеживается разделение их на три больших класса [17, 5]: экстраполяционные методы (ЭМ), вероятностные методы (ВМ) и реляционные методы (РМ).

Модели МК, построенные на основе ЭМ, носят наименование *модели коэффициентов роста* (по наименованию методов) или *линейные модели* (по форме записи). На рис. 1 представлен вид МК с принятыми ниже обозначениями.

Экстраполяционные методы формирования МК основаны на данных обследования существующего распределения пассажиропотоков и транспорта между корреспондирующими районами, а прогнозные расчеты МК осуществляются с использованием пропорциональных коэффициентов роста. К ЭМ относят следующие методы: единственного коэффициента роста; средних коэффициентов роста; детройтский; Фратара [6].

Метод единственного коэффициента роста (МЕКР) в качестве исходной информации использует фактические величины корреспонденций между транспортными районами города и прогноз их роста.



Рис. 1. Матрица корреспонденций

Коэффициент роста K определяется как отношение общих прогнозируемых корреспонденций P^* к общим фактическим корреспонденциям P^0 :

$$K = \frac{P^*}{P^0}, \quad (1)$$

где «*» – индекс прогнозируемой величины; «0» – индекс фактической величины.

Коэффициент роста K может зависеть от таких показателей, как количество населения P , величина дохода на душу населения I и уровень автомобилизации C :

$$K = \frac{f(P_i^d, I_i^d, C_i^d)}{f(P_i^c, I_i^c, C_i^c)}. \quad (2)$$

Объем прогнозируемых корреспонденций ρ_{ij}^* определяется согласно [13], как произведение количества фактических корреспонденций ρ_{ij}^0 , относящихся к i -му участку транспортной сети, на коэффициент роста K^0 , то есть

$$\rho_{ij}^* = K \rho_{ij}^0, \quad (3)$$

где ρ_{ij}^* – прогнозируемые корреспонденции; ρ_{ij}^0 – фактические корреспонденции.

Метод единственного коэффициента роста (рис. 2) не учитывает динамику развития между отдельными параметрами города и обладает низкой достоверностью.

На практике он используется для приближенных оценок транспортных потоков в условиях проектирования отдельных районов города на ближайшую перспективу.

Метод средних коэффициентов роста (МСКР) основывается на данных обследования фактических корреспонденций между районами.

Средние коэффициенты роста для i -го и j -го транспортных районов рассчитываются на основании общих фактических P_i^0, P_j^0 и общих прогнозируемых P_i^*, P_j^* корреспонденций для i -го и j -го транспортных районов и исчисляются следующим образом:

$$K_i = \frac{P_i^*}{P_i^0}; \quad K_j = \frac{P_j^*}{P_j^0}. \quad (4)$$

Объем прогнозируемых корреспонденций ρ_{ij}^1 определяется произведением количества фактических корреспонденций ρ_{ij}^0 и среднего арифметического между K_i и K_j , то есть

$$\rho_{ij}^1 = \rho_{ij}^0 \frac{(K_i^0 + K_j^0)}{2}, \quad (5)$$

где 1 – индекс прогнозируемой расчетной величины на первой итерации.

Поскольку величины корреспонденций, определяемые из соотношения (5), как пра-



Рис. 2. Метод единственного коэффициента роста

вило, не удовлетворяют следующему равенству

$$P_i^* = \frac{(K_i^0 + K_j^0)}{2} \sum_i^n \rho_{ij}^1, \quad (6)$$

то для его выполнения необходимо использовать приближенные методы решения. Тогда итерационная форма соотношения (6) примет вид:

$$\rho_{ij(i)}^k = \rho_{ij}^{k-1} \frac{(K_i^{k-1} + K_j^{k-1})}{2}, \quad (7)$$

где $k, k-1$ – шаги итераций.

Метод средних коэффициентов роста (рис. 3) учитывает различные темпы развития тех или иных районов города, однако, согласно [6, 5] при значительном росте подвижности населения, появлении новых жилых массивов или крупных промышленных зон этот метод приводит к большим погрешностям, поэтому в проектной практике почти не применяется.

Детройтский метод (ДМ) в отличие от МСКР, помимо коэффициентов роста отдельных районов учитывает также и коэффициент роста для всего города.

Величина прогнозных корреспонденций определяется как

$$\rho_{ij}^1 = \rho_{ij}^0 \frac{K_i^0 K_j^0}{K^0}; \quad K^0 = \frac{P^*}{P^0}. \quad (8)$$

Для соблюдения соответствия между прогнозируемыми и расчетными корреспонденциями прибегают к приближенным методам решения, тогда соотношение (8) примет вид:

$$\rho_{ij}^k = \rho_{ij}^{k-1} \frac{K_i^{k-1} K_j^{k-1}}{K^0}. \quad (9)$$

Детройтский метод (рис. 4) не сложен для расчетов и позволяет получить более высокую точность прогноза, чем МСКР, однако, такой прогноз может значительно отличаться от окончательных корреспонденций, и, как отмечается в [6], это отличие будет тем больше, чем больше отличаются темпы роста отдельного района от города в целом.

Метод Фратара (МФ) состоит в том, что объем корреспонденций из i -й зоны в j -ю для некоторого будущего момента времени пропорционален фактическому объему корреспонденций из i -й зоны, умноженному на коэффициент развития j -й зоны:

$$\rho_{ij(i)}^1 = \rho_{ij}^0 K_i^0 K_j^0 \left(\frac{L_i^0 + L_j^0}{2} \right), \quad (10)$$

где L_i^0, L_j^0 – коэффициенты роста корреспонденций в зоне m , обусловленных развитием i -й и j -й зон соответственно,

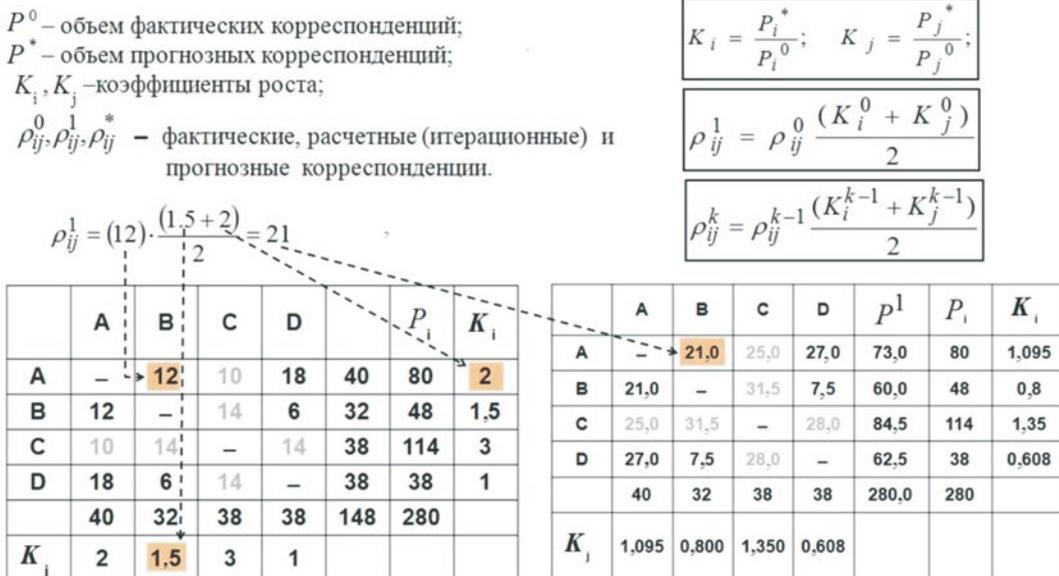


Рис. 3. Метод средних коэффициентов роста

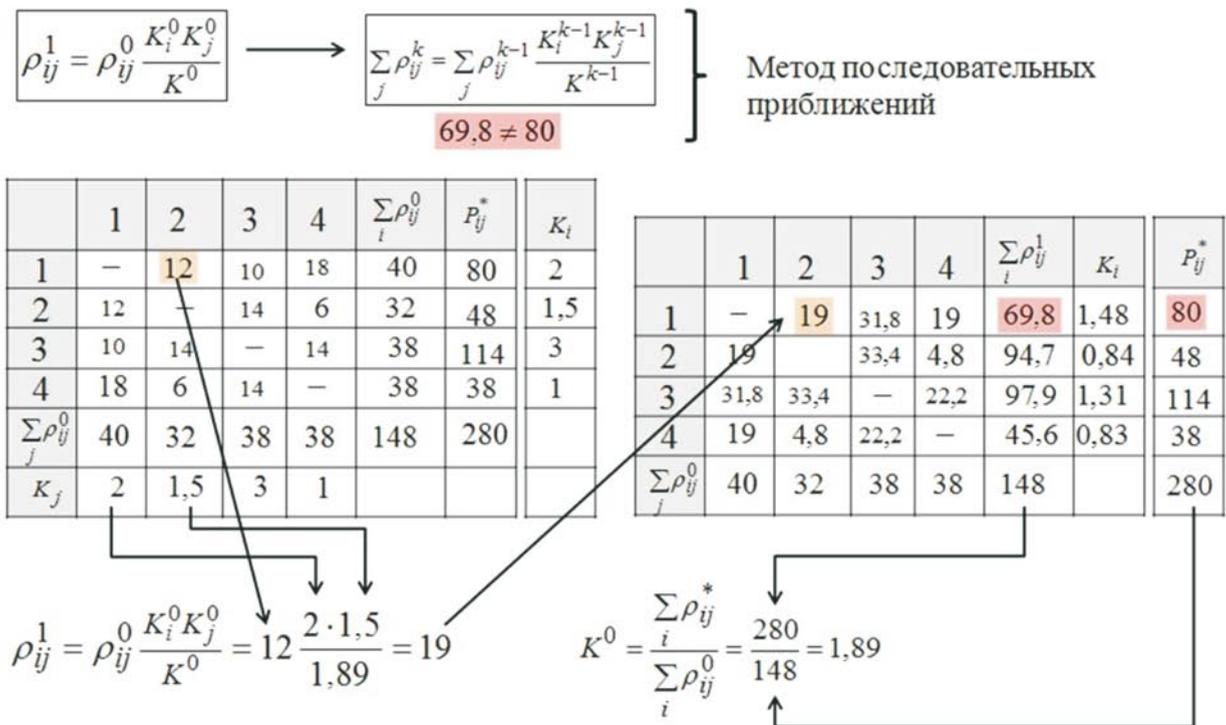


Рис. 4. Детройтский метод

$$L_i^0 = \frac{\sum_{m=1} \rho_{im}}{\sum_m \rho_{im} K_m}; \quad L_j^0 = \frac{\sum_{m=1} \rho_{jm}}{\sum_m \rho_{jm} K_m}, \quad (11)$$

где K_m – коэффициент развития для зоны с номером m , при этом m принимает множество значений, соответствующих всем рассматриваемым зонам.

Метод Фратара также использует итерационный процесс для приближения к окончательному решению:

$$\rho_{ij}^k = \rho_{ij}^{k-1} K_i^{k-1} K_j^{k-1} \left(\frac{L_i^{k-1} + L_j^{k-1}}{2} \right). \quad (12)$$

Результаты расчета каждого промежуточного шага являются исходными данными для последующего. Этот процесс ведется до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между заранее определенной величиной транспортного оборота района и суммой корреспонденций, полученной в результате расчета для этого района, то есть

$$P_i^* = K_j \sum_i \rho_{ij}^1. \quad (13)$$

Метод Фратара (рис. 5) получил наибольшее распространение среди всех экстраполяционных методов формирования МК.

В практике транспортного моделирования ЭМ широкого распространения не получили по следующим причинам:

для проведения расчетов ЭМ необходимо иметь информацию о фактических корреспонденциях между транспортными районами города;

динамика развития структуры города учитывается не адекватно.

Экстраполяционные методы преимущественно используются при низких темпах роста городов и небольших сроках прогноза – не более 5-7 лет.

Вероятностные методы формирования МК получили наибольшее распространение в перспективном городском транспортном планировании. Корреспонденции в этом случае определяются на основании эмпирических или теоретических зависимостей двух районов от численности их населения, количества мест приложения труда, условий поездок, размещения районов в

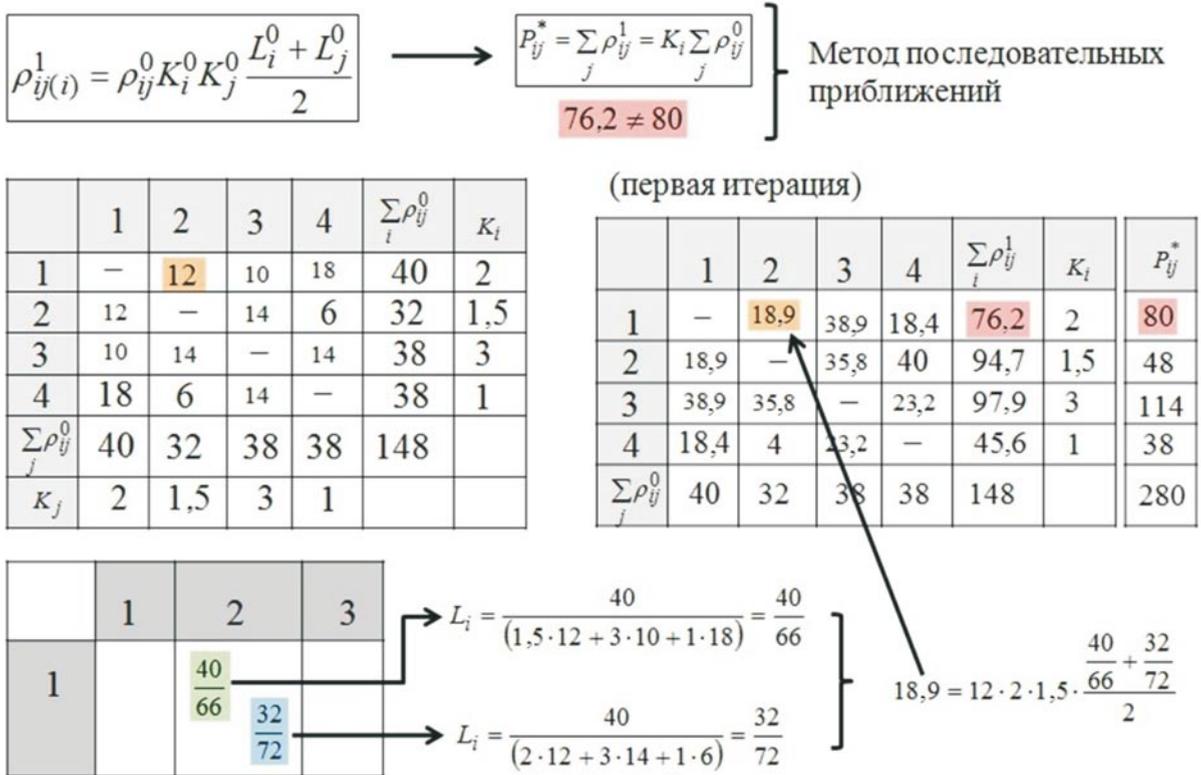


Рис. 5. Метод Фратара

плане города и других, подобных факторов. Эти методы более глубоко и полно учитывают изменения в размещении жилищных и промышленных образований, транспортной сети, в системе культурно-бытового обслуживания населения и т. д.

К ВМ, согласно [5, 2], относят гравитационные модели, энтропийные, конкурирующих центров и др.

Гравитационная модель (ГМ) основана на следующем положении: корреспонденция из района i в район j пропорциональна общему объему отправления из центра i , общему объему прибытия в центр j и обратно пропорциональна функции тяготения $f(c_{i,j})$, зависящей от удельных расходов $c_{i,j}$ на передвижение из источника i в сток j :

$$\rho_{ij}^* = k \frac{s_i d_j}{f(c_{i,j})}, \quad (14)$$

где ρ_{ij}^* – потенциальные корреспонденции между районами i и j ; k – калибровочный коэффициент; s_i – общий объем пользователей, выезжающих из источника i , $i \in S$;

d_j – общий объем пользователей, въезжающих в сток j , $d_j \in S$; $f(c_{i,j})$ – функция тяготения, зависящая от удельных расходов $c_{i,j}$ на передвижение из источника i в сток j .

При этом предполагается выполненным условие баланса общего прибытия и отправления:

$$\sum_{j=1}^n \rho_{i,j} = s_i, \quad \sum_{i=1}^m \rho_{i,j} = d_j, \quad (15)$$

$$\rho_{i,j} \geq 0, \quad i \in S, \quad j \in D,$$

где $\rho_{i,j}$ – расчетные корреспонденции между районами i и j .

Перепишем выражение (14) в виде:

$$\rho_{ij}^* = \alpha_i \beta_j s_i d_j f(c_{i,j}), \quad i \in S, \quad j \in D, \quad (16)$$

где α_i, β_j – калибровочные коэффициенты, которые определяются из системы:

$$\alpha_{i,j} = \left[\sum_{j \in D} \beta_j d_j f(c_{i,j}) \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\beta_{i,j} = \left[\sum_{j \in D} \alpha_j s_j f(c_{i,j}) \right]^{-1}.$$

Система (17) является совместной в случае равенства суммарных потоков по въезду и выезду, то есть

$$\sum_{i \in S} s_i = \sum_{j \in D} d_j.$$

Функция тяготения $f(c_{i,j})$ подбирается на основе расчетных данных и данных транспортной статистики. Коэффициенты α_i, β_j определяются методом балансировки Шацкого–Шелейховского [2].

Модель (15)–(17) программно разрешима с использованием итерационной процедуры расчета МК [2]. Итерационная процедура начинается с матрицы вида:

$$\rho_{ij}^{k+1} = \rho_{ij}^k + q_i r_j f(c_{ij}) \left[\sum_{l \in D} r_l f(c_{il}) \right]^{-1}. \quad (18)$$

Каждая итерация метода состоит из последовательности операций:

$$\rho_{ij}^k = \begin{cases} \rho_{ij}^k d_j \left[\sum_{l \in S} \rho_{il}^k \right]^{-1}, & \text{если } \sum_{i \in S} \rho_{ij}^k > d_j \\ \rho_{ij}^k, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$q_i = s_i - \sum_{j \in D} \rho_{ij}^k, \quad r_j = d_j - \sum_{i \in S} \rho_{ij}^k, \quad (19)$$

$$\rho_{ij}^{k+1} = \rho_{ij}^k + q_i r_j f(c_{ij}) \left[\sum_{l \in D} r_l f(c_{il}) \right]^{-1}.$$

Вычислительные эксперименты по расчету МК согласно [5] показали высокую скорость сходимости процесса (18), (19) к искомой МК.

К преимуществам традиционной гравитационной модели можно отнести доступность исходной информации и простоту выполнения расчетов.

В качестве недостатка следует отметить то, что существующий вариант реализации не является строго обоснованным с математической точки зрения, поскольку расчетная формула только отражает общие связи между параметрами модели, но не гарантирует полной аналогии корреспонденций между транспортными районами города. Центры прибытия ТП рассматриваются изолированно от возможных альтернативных центров.

Энтропийный метод (ЭнМ) моделирования городских систем можно назвать одним

из главных направлений «школы математического моделирования». В основе алгоритмов, реализующих энтропийную модель, лежит принцип достижения равновесия в исследуемой системе [2].

ЭнМ является своеобразным аналогом второго закона термодинамики и исходит из вероятностного описания поведения пользователей сети.

Руководствуясь принципом максимизации энтропии, наиболее вероятное состояние транспортной системы будет соответствовать МК вида

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j} \frac{v_{i,j}^{\rho_{i,j}}}{\rho_{i,j}} \rightarrow \max, \quad (20)$$

где $v_{i,j}^{\rho_{i,j}}$ – вероятность выбора индивидуумом коммуникации $\rho_{i,j}$.

Условие сбалансированности МК имеет вид (15), а ограничение на общие затраты при проезде представимо в следующей форме:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j} \cdot \rho_{i,j} = C, \quad (21)$$

где $c_{i,j}$ – удельные затраты на передвижение из источника i в сток j ; C – полные затраты в транспортной системе.

Разрешения модели (20), (21) осуществляются с использованием итерационной схемы [2], начиная с матрицы $\rho^0 = (\rho_{ij}^0 = v_{ij} : i \in S, j \in D)$, на каждой итерации метода попеременно достигается выполнение балансовых ограничений для выездов и въездов:

$$\rho_{i,j}^k = \rho_{i,j}^{k-1} s_i \left[\sum_{j \in D} \rho_{i,j}^{k-1} \right]^{-1};$$

$$\rho_{i,j}^k = \rho_{i,j}^{k-1} d_j \left[\sum_{i \in S} \rho_{i,j}^{k-1} \right]^{-1}. \quad (22)$$

В [2, 6] доказана сходимость процесса (22) к оптимальному решению задачи (20), (21).

Энтропийно-гравитационная модель (ЭГМ) позволяет вывести условия эквивалентности ГМ и ЭнМ. Руководствуясь сведениями [2, 5], запишем функцию Лагранжа, учитывая ограничения (21), (22) в следующем виде:

$$L(\rho, \lambda, \mu, \gamma) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\rho_{i,j} \ln \frac{v_{i,j}}{\rho_{i,j}} + \lambda_i (S_i - \rho_{i,j}) + \mu_j (d_j - \rho_{i,j}) + \gamma (C - c_{i,j} \rho_{i,j}) \right] \rightarrow \max, \quad (23)$$

где $\lambda = \{\lambda_i : i \in S\}$ – вектор двойственных переменных, удовлетворяющий балансовым ограничениям (21) для источников; $\mu = \{\mu_j : j \in D\}$ – вектор двойственных переменных, удовлетворяющий балансовым ограничениям (21) для стоков; γ – двойственная переменная, удовлетворяющая ограничению по затратам (22).

Точка максимума функции (23) должна соответствовать условиям (21), (22) и следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{i,j} = \alpha_i \beta_j s_i d_j v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \\ \alpha_i = \left[\sum_{j \in D} \beta_j d_j v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \right]^{-1} \\ \beta_j = \left[\sum_{i \in S} \alpha_i s_i v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \right]^{-1} \end{cases}, \quad (24)$$

где параметры α_i и β_j – калибровочные коэффициенты; параметр γ определяется в процессе калибровки модели согласно [2, 6].

Достоинством ЭНМ (24) является нахождение наиболее вероятного устойчивого состояния системы при независимом поведении пользователей.

Основной недостаток ЭНМ – замкнутость ТП внутри рассматриваемой сети, тем самым учет в модели транзитных потоков сопряжен с вводом дополнительных ограничений, что приводит к росту размерности модели.

Модель конкурирующих центров. Модели данного вида можно рассматривать как обобщения гравитационной модели, где в выражение (16) включаются дополнительные факторы, например индекс посещаемости района прибытия, определяемый формулой

$$I_{ij} = \sum_{l \in R, l \neq i, j} \frac{d_l}{tr_{lj}}. \quad (25)$$

Индекс посещаемости увеличивается по

мере приближения рассматриваемого района к альтернативным районам отправления. Введение этого фактора в модель позволяет моделировать агломерационные эффекты в структуре корреспонденций [6, 18, 19].

Реляционные методы формирования МК основаны на данных обследования существующего распределения пассажиропотоков и транспорта между корреспондирующими районами, в привязке к персональным характеристикам пассажиропотока, транспортных средств и объектов городской инфраструктуры. Как правило, сбор данных в этом случае осуществляется с использованием средств транспортного мониторинга.

Трилинейная модель (EVA), рассмотренная в [20, 21], одновременно дает формальное представление о процессах создания, распределения и разделения ТП. В трилинейной модели объем ТП из мест района отправления в места района прибытия рассчитывается на основе демографических и структурных показателей, а также степени подвижности, известной в результате статистических исследований передвижений населения. Расчет производится отдельно для каждого слоя спроса. В слой входят группы транспортных классов.

Группы «место отправления – место прибытия» – это дезагрегированные, однородные по поведению транспортные классы (табл. 1), выведенные из цепочки активностей (последовательности перемещений).

Каждое перемещение, направленное на определенное действие, относится к определенным категориям источников (Д – дом) и целей (Р – работа) и, таким образом, к соответствующей группе «место отправления – место прибытия» (Д-Р).

С «создаваемой стороны» к группе «источник–цель» относится как минимум одна базовая группа населения и со «стороны притяжения» как минимум одна величина структуры. Например, к группе «источник–цель» Д-Р со стороны источника относится основная базовая группа населения «Трудящиеся».

Указанные в табл. 2 группы могут быть разделены на подгруппы по дополнительным признакам и использованы для созда-

Таблица 1

Группы транспортных классов [20]

Цель Источник	К	Р	Д	У	С	Т	До	П
Квартира (К)		КР(1)	КД(1)	КУ(1)	КС(1)	КТ(1)	КДо(1)	КП(1)
Работа (Р)	РК	–	РП(1)					
Детское учреждение (Д)	ДК	ПР(2)	ПП(3)					
Учебное заведение (У)	УК							
Службное заведение (С)	СК							
Торговое учреждение (Т)	ТК							
Учреждение досуговой деятельности (До)	ДоК							
Прочее учреждение (П)	КП							

ния транспортного спроса. Таким образом, процесс классификации городского населения по слоям спроса задается следующим образом: каждой паре «место отправления (i) – место прибытия (j)», отражающей определенный слой спроса $DStr_c$ из множества $DStr_c \in DStr$, оператор классификации f_{ψ}^d ставит в соответствие свойство структуры $SG_{i(j)}s$ из множества $SG_{i(j)}$, от-

ражающее этот слой спроса:

$$f_{\psi}^d : DStr_c \rightarrow SG_{i(j)}s. \quad (26)$$

Для каждого слоя спроса и для каждой группы людей, которая используется в данном слое, должны быть определены степени подвижности (MR). Степень подвижности группы определяется как среднее количество перемещений в день на человека:

$$MR_{pc} = \frac{\text{Количество произведенных в СлСпр передвижений в группе } p}{\text{Количество людей в группе } p}. \quad (27)$$

На этапе создания транспортного движения из приведенных данных социальной структуры населения и характеристик для всех слоев спроса рассчитывается объем ТП из источника Q_{ic} и объем ТП в цель Z_{jc} или верхние границы Q_{ic}^{\max} и Z_{jc}^{\max} для этих объемов. Метод расчета зависит от того, к какому типу источника-цели относится

данная пара действий слоя спроса. Возможны три типа: 1) действие источника = действию на месте зарождения; 2) действие цели = действию на месте зарождения; 3) действие источника и действие цели \neq действию на месте зарождения.

Правила проведения расчета представлены в табл. 3. Данная модель опирается

Таблица 2

Свойства структуры и группы людей в слоях спроса [20]

Слой спроса	Свойство структуры /Группа района источника i	
$DStr_c$	$SG_{i(j)}s$	
ДР (WA)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДДет (WK)	МД(КК)	Маленькие дети
ДШ (WB)	Ш(SCH)	Школьники, обучающиеся в ПТУ, студенты
ДС (WD)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДМ (WE)	Ж(EW)	Жители
ДСвоб (WF)	Ж(EW)	Жители
.....

Таблица 3

Создание транспортного движения в модели EVA [20]

Этап	1. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 1
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Объем транспортного потока из источника Q , Q_{max} : $Q_{ic} = H_{ic}$
3	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{i=1}^m Q_{ic}; f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{ls} v_{isc}}$
4	Объем транспортного потока в месте назначения Z , Z_{max} : $Z_{jc} = f_c \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}; Z_{jc} \leq Z_{jc}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc};$ $\widehat{Z}_{jc} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc}; \underline{Z}_{jc} \widehat{Z}_{jc} \leq Z_{jc} \leq \overline{Z}_{jc} \widehat{Z}_{jc};$ $Z_{jc}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}$
Этап	2. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 2
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Объем транспортного потока в месте назначения Z , Z_{max} : $Z_{jc} = H_{jc}$
3	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{j=1}^m Z_{jc}; f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{ls} v_{isc}}$
4	Объем транспортного потока из источника Q , Q_{max} : $Q_{ic} = f_c \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}; Q_{ic} \leq Q_{ic}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} v_{isc};$ $\widehat{Q}_{ic} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} v_{isc}; \underline{Q}_{ic} \widehat{Q}_{ic} \leq Q_{ic} \leq \overline{Q}_{ic} \widehat{Q}_{ic};$ $Q_{ic}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}$
Этап	3. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 3
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{e=1}^m H_{ec};$

Таблица 3. Окончание

3	<p>Объем транспортного потока из источника Q, Q_{\max}:</p> $Q_{ic} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c.$ <p>Объем транспортного потока в месте назначения Z, Z_{\max}:</p> $Z_{jc} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c.$
---	---

на байесовскую вероятность. Постулируется принцип формирования потока: перемещение пользователя h начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j и при этом используется транспортное средство k .

В табл. 3 приняты следующие обозначения: e – индекс района причины перемещений (район места зарождения); i – индекс района источника перемещений; j – индекс района цели перемещений; s – индекс свойства структуры; p – индекс группы; c – индекс слоя спроса; m – количество районов в области исследования; MR_{epc} – степень подвижности группы p за единицу времени; ER_{isc} – степень создания свойства структуры s за единицу времени; BP_{ep} – количество людей в группе p ; SG – свойство структуры; u_{epc} – доля перемещений, реализованных в области исследования как внутреннее транспортное движение; v_{isc} – доля свойств структуры, действительная для внутреннего транспортного движения в области исследования; H_{epc} – объем транспортных потоков на месте зарождения для группы p ; H_{ec} – общий объем транспортных потоков на месте зарождения; Q_{ic} – объем транспортных потоков из источника; Z_{jc} – объем транспортных потоков в цель; Q_{ic}^{max} – максимально возможный объем транспортных потоков из источника; Z_{jc}^{max} – максимально возможный объем транспортных потоков в цель; $\underline{Q}_{ic}, \bar{Q}_{ic}$ – фактор нижней или верхней границы объема транспортного потока из источника; $\underline{Z}_{jc}, \bar{Z}_{jc}$ – фактор нижней или верхней границы объема транспортного потока в цель; Q_{ic}^{pot} – потенциально

возможный объем транспортного потока в источнике; Z_{jc}^{pot} – потенциально возможный объем транспортного потока в цели; V_c – общий объем потока; фактор, учитывающий соблюдение балансового условия $V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j$ при расчете объемов транспортных потоков районов.

С помощью A_i, E_j, M_k обозначаются события, информирующие о том, что перемещение начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j , при этом используется транспортное средство k .

Предполагается, что эти события происходят независимо друг от друга, тогда безусловные вероятности $P(A_i), P(E_j), P(M_k)$ можно представить как

$$P(A_i) = \frac{s_i}{P} \phi_{s_i}; \quad P(E_j) = \frac{d_j}{P} \phi_{d_j}; \quad (28)$$

$$P(M_k) = \frac{tr_k}{P} \phi_{tr_k}.$$

Условные вероятности из создания ТП примут вид

$$P(A_i|W) = \frac{s_i}{P}; \quad P(E_j|W) = \frac{d_j}{P}; \quad (29)$$

$$P(M_k|W) = \frac{tr_k}{P},$$

где $P = \sum_i s_i$ – общий поток транспорта

Таким образом, для всех i, j, k определены условные вероятности наступления события W в виде:

$$L_{ijk} = P(W|(A_i \cap E_j \cap M_k)), \quad (30)$$

или ненаступления события \bar{W} в виде:

$$\bar{L}_{ijk} = P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k)) = 1 - L_{ijk}. \quad (31)$$

Из предположения о том, что ТП

$\rho_{i,j,k}$ пропорциональны к условным вероятностям $P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k))$, следует, что

$$\rho_{i,j,k} = P((A_i \cap E_j \cap M_k) | W) P = \frac{P(A_i)P(E_j)P(M_k)P(W | (A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P(A_{i'})P(E_{j'})P(M_{k'})P(W | (A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}))} P. \quad (32)$$

Вероятность может быть квантифицирована с помощью установок, которые можно проверить эмпирическим путем. Базовая трilinearная модель с условиями контрольных сумм транспортных корреспонденций задается в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} &= s_i, & \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} &= d_j, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j,k} &= tr_k, & \rho_{i,j,k} &= L_{i,j,k} \phi_{s_i} \phi_{d_j} \phi_{tr_k}, \end{aligned} \quad (33)$$

где $L_{i,j,k}$ – вероятность оценки; $\phi_{s_i}, \phi_{d_j}, \phi_{tr_k}$ – калибровочные коэффициенты, определяемые эмпирическим или расчетным путем, содержащие информацию о предпочтении перемещений.

Данная модель позволяет с высокой степенью достоверности оценить величину транспортного предложения и транспортного спроса. Достоинством модели является возможность учитывать некоторые данные с геоинформационных систем и систем учета статистических данных.

К недостаткам данной модели можно отнести невозможность учета неподвижного транспорта. Абстрактная система классификации транспортной активности городского населения, принятая в модели EVA, не позволяет производить анализ транспортной активности в границах системы государственной статистики РФ. В модели также затруднена реализация обратной связи с участниками транспортного процесса.

Приведем сравнение рассмотренных выше моделей матриц корреспонденций в табл. 4.

В табл. 4 приняты следующие обозначения: ВД – вероятностные данные; ДНР – достоверные нерегулярные данные; Н – низкая степень детализации (район, автомобильные дороги); С – средняя степень детализации (Н + автомобильные перекрестки, виды транспортных средств); В –

высокая степень детализации (С + микрорайон, объекты инфраструктуры, транспортные средства и жители дифференцированы по примитивным классам, участки автомобильных и пешеходных дорог).

Из результатов сравнения очевидно, что трilinearная модель на порядок превосходит представленные нами модели МК. Использование трilinearной модели рассмотрим на примере моделирования процесса распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций: «Адмиралтейская», «Обводный канал», «Бухарестская» и «Международная».

Решение практической задачи. Разработка моделей распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена осуществлена в программе PTV Vision® VISUM.

Мы рассмотрим четыре модели: первая отражает ситуацию до ввода новых станций метро (2010 г.); вторая включает в себя две новые станции метро «Адмиралтейская» и «Обводный канал» (2011 г.); третья включает в себя еще две новые станции метро «Международная» и «Бухарестская» (2012 г.); четвертая включает в себя сравнение исходной модели с моделью, в которой введены все четыре станции метрополитена.

В качестве исходных данных использовались:

1) городская базовая транспортная модель Санкт-Петербурга (380 транспортных районов, 4 400 примыканий, 32 000 узлов, население 4 650 тыс. чел.);

2) план Фрунзенского и Центрального районов;

3) общие сведения об исследуемых районах (жилые, торговые, учебные, промышленные и иные общественные здания и сооружения);

4) данные статистики (сведения о насе-

Таблица 4

Сравнения методов и моделей построения МК

Параметры сравнения	Экстраполяционные методы				Вероятностные методы			Реляционные методы
	МЕКР	МСК	ДМ	МФ	ГМ	ЭГМ	МКЦ	EVA
Моделирование ГТС	-	-	-	-	-	-	-	Да
Классификация объектов	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Данные для построения МК	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ДнРД(ВД)
Степень детализации	Н	Н	Н	Н	С	С	С	В
Учет развития города	-	-	-	-	-	-	Частично	Да
Учет неподвижных транспортных объектов	-	-	-	-	-	-	-	-
Учет строительства новых транспортных и инфраструктурных объектов	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет новых видов транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет расписаний пассажирского транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет расписаний пассажирского транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет стоимости проезда	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет специальных видов транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Учет альтернативных маршрутов	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Учет характеристик транспортных объектов	-	-	-	-	-	-	-	Частично

лении, о рабочих местах);

5) данные транспортных структур (типы дорог, среднегодовая суточная интенсивность, пропускная способность в час);

6) транспортная статистика (расписания и маршруты общественного транспорта).

Построение информационно-логической модели транспортного процесса разберем на примере ввода станций метро «Бухарестская» и «Международная».

Связь района с сетью осуществляется через примыкания его центра тяжести к узлам транспортной сети. Через примыкания осуществляется генерация и поглощение ТП данным районом.

Схема транспортных районов с примыканиями для сценария с вводом станций «Бухарестская» и «Международная» при-

ведена на рис. 6, а промежуточная модель взаимодействия транспортного спроса и предложения для Фрунзенского района представлена на рис. 7.

На следующем этапе в модель заносятся маршруты городского пассажирского транспорта: автобусные, троллейбусные и трамвайные. Для каждого варианта маршрута задается расписание движения.

Разработка информационно-логической модели для сценария ввода станций метро «Адмиралтейская» и «Обводный канал» осуществляется аналогично.

На этом создание транспортной модели заканчивается и можно приступить к процедурам прогнозного моделирования ТП.

Данные спроса заносятся в матрицу пассажирских корреспонденций. Матрица

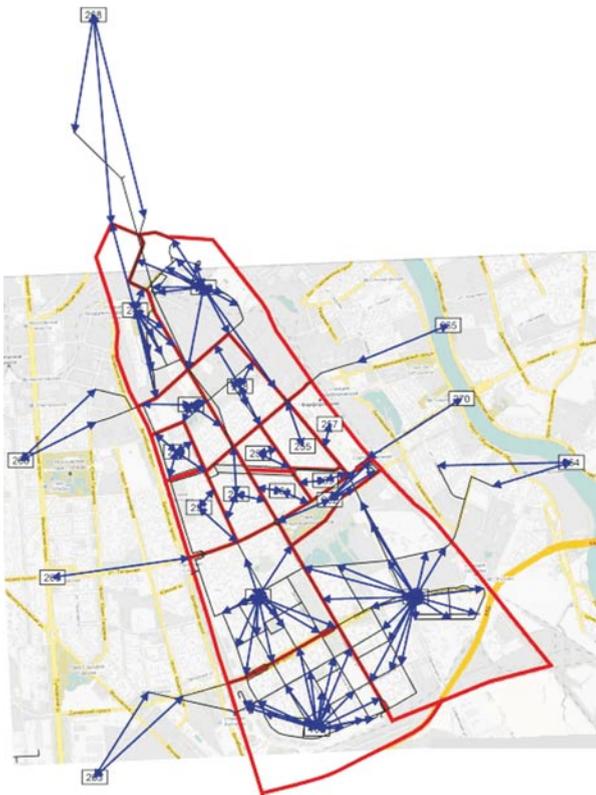


Рис. 6. Транспортные районы с примыканиями для сценария с вводом станций «Бухарестская» и «Международная»



Рис. 7. Промежуточная модель взаимодействия транспортного спроса и предложения во Фрунзенском районе для сценария 2012 г., пас./сут.

сетевых корреспонденций строится после расчета нагрузки на транспортную сеть, согласно табл. 3. В этой матрице отмечается корреспонденция пассажиров от одного микрорайона до другого. Вычисления осуществляются согласно (28)–(33)

Таким образом, на основе рассчитанных моделей нами была получена модель взаимодействия транспортного спроса и предложения, рассчитывающая перераспределение ТП.

Основные результаты прогноза распределения ТП на УДС Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена по рассмотренным выше сценариям получим в результате моделирования всей транспортной модели Санкт-Петербурга.

Для наглядности результаты расчета представим в виде укрупненных картограмм: транспортная модель 1 (рис. 8); транспортная модель 2 (рис. 9); транспортная модель 3 (рис. 10); транспортная модель 4 (рис. 11).

1. Ввод станций «Адмиралтейская» и «Обводный канал» вызовет следующие изменения.

На внутренней сети метрополитена:

- минимальный пассажиропоток на станции «Адмиралтейская» после ее ввода составит не менее 22 000 пас./сут., а на станции «Обводный канал» – не менее 27 000 пас./сут.;

- на величину более 2000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Василеостровская» (2160), «Пионерская» (2047), «Садовая» (2145), «Маяковская» (2239);

- на величину более 5000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Невский проспект-1» (7770), «Лиговский проспект» (8284), «Площадь Восстания-1» (5950);

- вследствие перераспределения пассажиропотоков на величину более 2000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Комендантский проспект» (2978), «Спортивная» (4117), «Сенная площадь»



Рис. 8. Транспортная модель 1



Рис. 9. Транспортная модель 2



Рис. 10. Транспортная модель 3



Рис. 11. Транспортная модель 4

(2040), «Волковская» (3651);

- на величину более 5000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Звенигородская» (5916), «Спасская» (7872).

На улично-дорожной сети Санкт-Петербурга:

- на величину более 1000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Салова (1300), Лиговский проспект (1100), Витебский проспект (2300), наб. Обводного канала (1000), Заневский проспект (1000), Большой проспект В.О. и Наличную улицу (900);

- на величину более 2000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Дворцовую наб., Троицкий мост (в обоих направлениях) и Каменноостровский проспект (2100), наб. Робеспьера, Литейный проспект и Литейный мост (в обоих направлениях) и Лесной проспект (2000).

- на величину более 1000 пас./сут. возрастет нагрузка по всему Витебскому проспекту до железнодорожного переезда (1000), по Невскому проспекту в сторо-

ну моста Александра Невского (1100), на Малый проспект В.О. (1100), по Невскому проспекту от пересечения с Лиговским проспектом до улицы Садовой (1800);

- на величину более 2000 пас./сут. возрастет нагрузка на Бухарестскую ул, Дворцовый мост, Биржевой мост, набережную Макарова и проспект Добролюбова (от 2000).

2. Ввод станций «Международная» и «Бухарестская» вызовет следующие изменения.

Пассажиропоток на внутренней сети метрополитена:

- минимальный пассажиропоток на станции «Международная» после ее ввода составит не менее 52 000 пас./сут., а на станции «Бухарестская» – не менее 20 000 пас./сут.

- на величину более 5000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Московская» (10 544), «Московские Ворота» (6001), «Технологический институт» (5861), «Электросила» (8148), «Садовая» (2145), «Невский проспект» (17 066), «Гостиный двор» (5600), «Василеостровская» (6424), «Маяковская»

Таблица 5

Обобщенные суточные транспортные показатели

Обобщенные суточные транспортные показатели	2010	2010	2012	2010-2011	2010-2012
Общее время поездки, ч/сут.	2024422	2022672	2016413	1750	8009
Общее время перевозки, ч/сут.	1430860	1429109	1422851	1751	8009
Общее время поездки в ТС ОТ, ч/сут.	1115960	1115109	1109998	851	5962
Общее время пересадки ОТ, ч/сут.	49025	48702	48275	323	750
Общее время, затрачиваемое пешеходом при пересадке ОТ, ч/сут.	265873	265297	264577	576	1296
Общее воспринимаемое время поездки ОТ, ч/сут.	9758316	9739724	9709115	18592	49201
Общая длина поездки ОТ, км/сут.	43538652	43522220	43506314	16432	32338
Общие пассажирКм ОТ, км/сут.	38181932	38170821	38138312	11111	43620
Общая частота пересадок ОТ, шт./сут.	2687788	2681747	2668782	6041	19006
Перевозки по маршрутам ОТ	5231626	5225585	5212620	6041	19006
ПассПоездкиОТ 0 Пересадок, шт.	610370	612518	617653	-2148	-7283
ПассПоездкиОТ 1 Пересадка, шт.	1179147	1180892	1183586	-1745	-4439
ПассПоездкиОТ 2 Пересадки, шт.	754321	750428	742598	3893	11723

(2239), «Лиговский проспект» (12 059), «Площадь Восстания-1» (10 083), «Волковская» (14 256).

- вследствие перераспределения пассажиропотоков на величину более 5000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Комендантский проспект» (5907), «Спортивная» (12 050), «Сенная площадь» (9748), «Пушкинская» (5821), «Звенигородская» (14 711), «Спасская» (26 820).

Пассажиропоток на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга:

- на величину более 1000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Салова (1300), проспект Славы (2400), проспект Обуховской обороны (1600), Лиговский проспект (1100), Витебский проспект после железнодорожного переезда (2300), наб. Обводного канала (1000), Дунайский проспект (1100), Невский проспект (2300).

Обобщенные суточные транспортные показатели для рассматриваемых транспортных моделей представлены в табл. 5.

Транспортные модели продемонстрировали высокую скорость сходимости при работе с матрицами большой размерности 1000×1000.

Таким образом, в ходе проведенного исследования нами было осуществлено следующее: проведен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций

и произведен выбор реляционного метода построения МК, т. к. он наиболее детально отображает взаимосвязи между объектами; выбрана трилинейная модель, поскольку она позволяет учитывать данные с геоинформационных систем; на базе предложенной модели осуществлен прогноз распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций метрополитена («Адмиралтейская», «Обводный канал», «Бухарестская» и «Международная»).

Рассмотренная модель распределения городских ТП хорошо согласуется с логико-алгоритмическими моделями систем управления ГТС [12, 13], логико-алгебраическими моделями систем управления логистикой [22, 23] и моделями пространственной организации ГТС [24]. Ее интеграция на принципах [25, 26] в программно-аппаратные системы управления городским транспортом [27] позволит качественно повысить эффективность транспортного обслуживания [28, 29] за счет точности прогноза дорожно-транспортной обстановки на улично-дорожной сети города.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и технической поддержке компании A+S.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белый О.В.** Фундаментальные проблемы развития транспортного комплекса // Экономика качества. 2013. №3. С. 23–28.
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Под ред. А.В. Гасникова. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 360 с.
3. **Горбачев П.Ф., Крикун В.И.** Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном сообщении // ВЕЖПТ. 2013. № 3(62), С. 12–15.
4. **Горбачев П.Ф., Колий А.С.** Методика расчета емкостей транспортных районов с учетом динамических процессов в транспортной системе // Автомобильный транспорт. 2012. № 30. С. 139–143.
5. **Селиверстов Я.А.** Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // Известия СПбГЭТУ

- «ЛЭТИ». 2013. № 1. С. 43–49.
6. **Швецов В.И.** Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автомат. и телемех. 2009. № 10. С. 148–157.
7. **Xinwei W., Ning Z.** GLS Estimation of OD matrix with traffic counts and information from ATIS // Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005. Vol. 5, Pp. 1188–1196.
8. **Zhou X., Mahmassani H.S.** Dynamic OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification Data // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2006. Vol. 7. No. 1. Pp. 105–114.
9. **Lo H.P., Zhang N., Lam W.H.K.** Decomposition algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts // Transportation Research. Part B. 1999. No. 33. Pp. 369–385.

10. Wang J.M. The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction // *Ningxia Engineering Technology*. 2002. Vol. 1. No. 4. Pp. 362–365.
11. Zhou X., Mahmassani H.S. A Structural State Space Model for Real-Time Traffic Origin-Destination Demand Estimation and Prediction in A Day-to-Day Learning Framework // *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2007. Vol. 41B. Pp. 823–840.
12. Селиверстов Я.А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // *Науковедение*. 2014. № 5. С. 188.
13. Селиверстов Я.А., Стариченков А.Л. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2014. № 6(210). С. 81–94.
14. Малыгин И.Г., Сиек Ю.Л., Яковлева М.В. Принцип сложности при прогностическом моделировании транспортных объектов // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2014. № 3. С. 3–7.
15. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Стариченков А.Л. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. № 1. С. 29–36.
16. Селиверстов С.А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2014. Вып. 2(24). С. 92–100.
17. Гасников А.В., Гасникова Е.В., Фелько О.С. О возможной динамике в модели ранжирования web-страниц PageRank и модернизированной модели расчета матрицы корреспонденций // *Труды Московского физико-технического ин.* 2012. Т. 4. № 2(14). С. 101–120.
18. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. № 3 (31). С. 83–92.
19. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. Вып. 2(30). С. 69–80.
20. Lohse D. Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice. Dresden: Technical University of Dresden, 2004. Pp. 1–15.
21. Traffic. Mobility. Logistics. PTV Vision. Visum 11.0. Basics. PTV AG. Karlsruhe, 2009. 692 p.
22. 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.
23. Селиверстов Я.А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. № 1(20). С. 145–152.
24. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Науковедение*. 2014. № 3. С. 122.
25. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 4(199). С. 34–48.
26. Селиверстов Я.А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора // *Науковедение*. 2014. № 4. С. 90.
27. Кокаев О.Г., Лукомская О.Ю., Селиверстов С.А. О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования // *Транспорт РФ*. 2012. № 2(39). С. 32–36.
28. Куватов В.И., Шагалова Н.В., Онов В.А. Пути ускорения перевозок и повышения безопасности автомобильного транспорта // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2013. № 2(26). С. 26–33.
29. Бахарев Т.С., Гадышев В.А., Плотников Ю.А. Применение геоинформационных систем для решения прикладных задач предупреждения чрезвычайных ситуаций // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. 2010. Т. 6. № 2. С. 12–17.

REFERENCES

1. **Belyy O.V.** Fundamentalnyye problemy razvitiya transportnogo kompleksa [The fundamental problems of the transport sector]. *Ekonomika kachestva [The economics of quality]*, 2013, No. 3, Pp. 23–28. (rus)
2. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov [Introduction to the mathematical modeling of traffic flows]*. Moscow: MFTI Publ., 2010, 360 p. (rus)
3. **Gorbachev P.F., Krikun V.I.** Modelirovaniye sprosa na perevozku passazhirov v prigorodnom soobshchenii [Modeling the demand for the transport of passengers in suburban]. *VEZhPT*, 2013, No. 3 (62), Pp. 12–15. (rus)
4. **Gorbachev P.F., Koliy A.S.** Metodika rascheta yemkostey transportnykh rayonov s uchedom dinamicheskikh protsessov v transportnoy sisteme [Methods of calculating areas of transport containers with the dynamic processes in the transport system]. *Avtomobilnyy transport [Automobile transport]*, 2012, No. 30, Pp. 139–143. (rus)
5. **Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh [Modelling of processes of distribution and development of traffic in big cities]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)
6. **Shvetsov V.I.** Algoritmy raspredeleniya transportnykh potokov [Algorithms for distributing traffic flows]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 2009, No. 10, Pp. 148–157. (rus)
7. **Xinwei W., Ning Z.** GLS Estimation of OD matrix with traffic counts and information from ATIS, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, Vol. 5, Pp. 1188–1196.
8. **Zhou X., Mahmassani H.S.** Dynamic OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification Data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, Vol. 7, No. 1, Pp. 105–114.
9. **Lo H.P., Zhang N., Lam W.H.K.** Decomposition algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts, *Transportation Research, Part B*, 1999, No. 33, Pp. 369–385.
10. **Wang J.M.** The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction, *Ningxia Engineering Technology*, 2002, Vol. 1, No. 4, Pp. 362–365.
11. **Zhou X., Mahmassani H.S.** A Structural State Space Model for Real-Time Traffic Origin-Destination Demand Estimation and Prediction in A Day-to-Day Learning Framework, *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2007, Vol. 41B, Pp. 823–840.
12. **Seliverstov Ya.A.** O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa [On the construction of classification models mezhagentykh relations of social and economic behavior of the urban population in traffic management systems metropolis]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*, 2014, No. 5, Pp. 188. (rus)
13. **Seliverstov Ya.A.** Postroyeniye modeley upravleniya gorodskimi transportnymi potokami v usloviyakh neopredelennosti vneshney informatsionnoy sredy [Construction of an Urban Traffic Control Model Under the Conditions of Information Uncertainty]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 6 (210), Pp. 81–94. (rus)
14. **Malygin I.G., Siyek Yu.L., Yakovleva M.V.** Printsip slozhnosti pri prognosticheskom modelirovaniy transportnykh obyektov [The principle difficulty in predictive modeling of transport facilities]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye [Transport: science, technology, management]*, 2014, No. 3, Pp. 3–7. (rus)
15. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A., Starichenkov A.L.** Osobennosti postroyeniya sistemy gorodskogo transportno-logisticheskogo monitoringa [Features of construction of urban transport and logistics monitoring]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, No. 1, Pp. 29–36. (rus)
16. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy [Methods and algorithms for intellectual analysis of the organization of the transport system]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2014, No. 2(24), Pp. 92–100. (rus)
17. **Gasnikov A.V., Gasnikova Ye.V., Fedko O.S.** O vozmozhnoy dinamike v modeli ranzhirovaniya web-stranits PageRank i modernizirovannoy modeli rascheta matritsy korrespondentsiy [On the possible dynamics in the model ranking of web-pages

PageRank and the upgraded model of calculation of the matrix of correspondence]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology]*, 2012, Vol. 4, No. 2 (14), Pp. 101–120. (rus)

18. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Primeneniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki effektivnosti novykh vidov gorodskogo passazhirskego transporta [Application of the simulation to evaluate the effectiveness of new types of urban passenger transport], *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 3(31), Pp. 83–92. (rus)

19. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye transportnykh potokov megapolisa s vvodom novykh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskego transporta [Simulation of traffic metropolis with the introduction of new types of water intercity passenger transport]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 2(30), Pp. 69–80. (rus)

20. **Lohse D.** *Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice*. Dresden, Technical University of Dresden, 2004, Pp. 1–15

21. *Traffic. Mobility. Logistics. PTV Vision. Visum 11.0. Basics*. PTV AG. Karlsruhe, 2009, 692 p.

22. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsessa [About logical-algebraic description of the transport logistic process]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

23. **Seliverstov Ya.A.** Ispolzovaniye pravila rezolyutsiy v voprosno-otvetnoy protsedure transportnogo planirovshchika [Using the rule of resolutions in question-answer procedure transport planner]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral*

Makarov]. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2013, No. 1(20), Pp. 145–152. (rus)

24. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktnogo nepreryvnogo transportnogo protsessa dvizheniya [Fundamentals of the theory of continuous conflict-free movement of the transport process]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 3, P. 122. (rus)

25. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Formalnaya aksiomatika teorii funktsionalnogo subyektivnogo potrebitelskogo povedeniya [Formal axiomatic of subjective «functional» theory of consumer]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskkiye nauki [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(199), Pp. 34–48. (rus)

26. **Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora [Fundamentals of the theory of subjective functionality of rational choice]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*, 2014, No. 4, P. 90. (rus)

27. **Kokayev O.G., Lukomskaya O.Yu., Seliverstov S.A.** O tekhnologii analiza transportnykh protsessov v sovremennykh usloviyakh khozyaystvovaniya [On the technology of the analysis of transport processes in the contemporary economy]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2012, No. 2 (39), Pp. 32–36. (rus)

28. **Kuvatov V.I., Shatalova N.V., Onov V.A.** Puti uskoreniya perevozok i povysheniya bezopasnosti avtomobilnogo transporta [Ways to speed up traffic and increase the safety of road transport]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere [Problems of risk management in the technosphere]*, 2013, No. 2(26), Pp. 26–33. (rus)

29. **Bakharev T.S., Gadyshev V.A., Plotnikov Yu.A.** Primeneniye geoinformatsionnykh sistem dlya resheniya prikladnykh zadach preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy [The use of geographic information systems for applications Emergency Prevention]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii [Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia]*, 2010, Vol. 6, No. 2, Pp. 12–17. (rus)

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

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

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

SELIVERSTOV Yaroslav A. IPT RAS.

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

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

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

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

E-mail: amuanator@rambler.ru

SELIVERSTOV Sviatoslav A. IPT RAS.

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

E-mail: amuanator@rambler.ru

**ГЕНЕРАЦИЯ МНОГОМЕРНОГО СЛУЧАЙНОГО
ПРОЦЕССА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

A.A. Akishin, A.N. Savoskin

**GENERATING A MULTIDIMENSIONAL PERTURBED
STOCHASTIC PROCESS IN RAILWAYS ROLLING
STOCK DYNAMICS**

Во время движения поезда по железнодорожному пути на него воздействует возмущение в виде вертикальной и горизонтальной неровностей правой и левой рельсовых нитей, вызывающих колебания механической части подвижного состава. В связи с этим возникает проблема генерации многомерного процесса возмущения по заданной матрице автокорреляционной и взаимокорреляционной функции или спектральной плотности. Для этого создан формирующий механизм во временной области. С помощью данного механизма можно выполнить генерацию многомерных случайных процессов возмущения при различных скоростях движения с любой длиной реализации и шагом дискретизации во временной области.

ГЕНЕРАЦИЯ МНОГОМЕРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА; ВОЗМУЩЕНИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА; ФОРМИРУЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ.

When a train is moving along the tracks, it is exposed to perturbations in the form of vertical and horizontal irregularities of the right and left rails causing oscillations in the mechanical parts of the rolling stock. This raises the problem of generating a multidimensional stochastic process of disturbances in accordance with a given matrix of auto-correlation and cross-correlation functions or spectral densities. For this purpose, the forming mechanism in the temporary realm was designed. This mechanism allows generating multidimensional stochastic processes of irregularity at different speeds for any length of implementation or discretization step in the temporary realm.

GENERATING MULTIDIMENSIONAL STOCHASTIC PROCESS; PERTURBING FACTOR CAUSING OSCILLATIONS OF RAILWAY VEHICLES; FORMING MECHANISM IN THE TEMPORARY REALM.

Для решения задач динамики подвижного состава железных дорог необходимо выполнять генерацию многомерного гауссовского стационарного случайного процесса возмущения $\|y(t)\|$ по известным его характеристикам – матрице авто- и взаимокорреляционных функций $\|R_{yiu}(\tau)\|$ или матрице спектральных и взаимных спектральных плотностей $\|G_{yiu}(j\omega)\|$.

С этой целью обычно используют фор-

мирующий механизм [1], структурная схема которого приведена на рис. 1. Этот механизм состоит из m некоррелированных генераторов белого шума ($\text{ГШ}_1 \div \text{ГШ}_m$) и из $0,5m(m+1)$ линейных устойчивых минимальнофазовых фильтров с передаточными функциями $\|W_{iu}(j\omega)\|$. Однако эта схема применима к аналоговым системам, в которых ГШ_i и фильтры представляют собой реальные физические устройства.

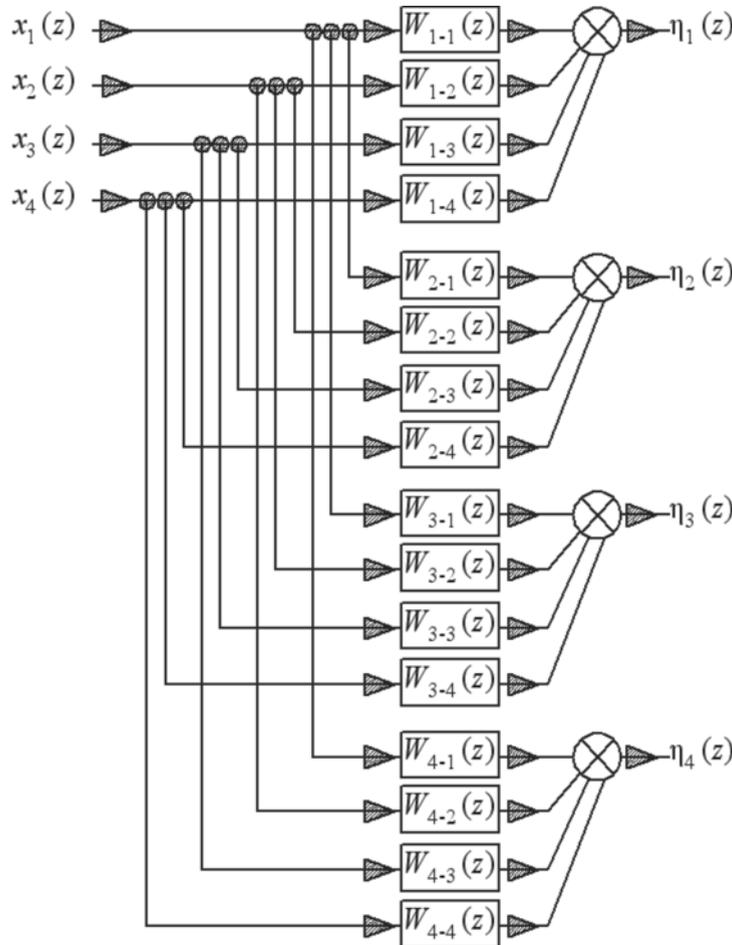


Рис. 1. Структурная схема формирующего механизма в операторной области

При программной реализации каждый ГШ_i генерирует дискретную последовательность чисел $x_i[nT]$, $n = 1, 2, \dots, N$ (T – шаг временной дискретизации), распределенных по гауссовскому закону со спектральной плотностью, равной единице. При этом последовательности $x_i[nT]$ не коррелированы между собой. Этот процесс необходимо преобразовать в многомерный гауссовский стационарный случайный процесс с заданной матрицей спектральных плотностей $\|G_{yiu}(j\omega)\|$ размером $i \times u = m \times m$, где $i = 1, 2, 3, \dots, m$ и $u = 1, 2, 3, \dots, m$. В качестве алгоритма решения такой задачи предлагается следующая процедура.

1. Поскольку процессы на выходе ГШ_i являются дискретными, то вначале необходимо получить матрицу дискретных спектральных плотностей $\|G_{yiu}(z)\|$ выходного

процесса $y(nT)$, выполнив дискретное преобразование Лапласа:

$$X(z) = Z\{x(nT)\} = \sum_{n=0}^{\infty} x[n]z^{-n}, \quad (1)$$

где $z = e^q = e^{pT}$; матрицы корреляционных функций $\|R_{yiu}(nT)\|$:

$$\|G_{yiu}(z)\| = Z\{\|R_{yiu}(nT)\|\}. \quad (2)$$

2. Представить матрицу $\|G_{yiu}(z)\|$ в следующем виде:

$$\|G_{yiu}(z)\| = \|W_{iu}^*(z)\| \cdot \|W_{iu}(z)\| \cdot \|G_{xiu}(z)\|, \quad (3)$$

где $\|W_{iu}^*(z)\|$ – матрица дискретных частотных характеристик, эрмитовски сопряженная с матрицей $\|W_{iu}(z)\|$; $\|G_{xiu}(z)\|$ – матрица единичных спектральных плотностей некоррелированных сигналов на выходе генераторов белого шума размером $m \times m$:

$$\|G_{x_{iu}}(z)\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

3. Поскольку задача решается во временной области, то, в отличие от [1] и [2], матрицу $\|W_{iu}(z)\|$ необходимо преобразовать в матрицу импульсных характеристик с помощью обратного дискретного преобразования Лапласа:

$$\|k_{iu}(nT)\| = Z^{-1}\{\|W_{iu}(z)\|\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\pi}^{c+j\pi} \|W_{iu}(z)\| e^{qn} dq. \quad (4)$$

4. Вычислить выходной процесс $\eta_{iu}(nT)$ с помощью интеграла свертки:

$$y_{iu}(nT) = \int_0^{\infty} k_{iu}(nT - \zeta)x_{iu}(\zeta)d\zeta. \quad (5)$$

Реализация этого алгоритма может быть выполнена по новой схеме формирующего механизма (рис. 2), содержащего импульсные характеристики $k_{iu}(nT)$ и интеграторы, выполняющие вычисление интеграла свертки (5).

В качестве примера рассмотрим генерацию четырехмерного гауссовского стационарного случайного процесса возмущений в виде вертикальных и горизонтальных неровностей $\eta_{iuss}(x = vt)$ левого и правого рельсов, вызывающего колебания рельсовых экипажей. Здесь $i = s = 1$ соответствует

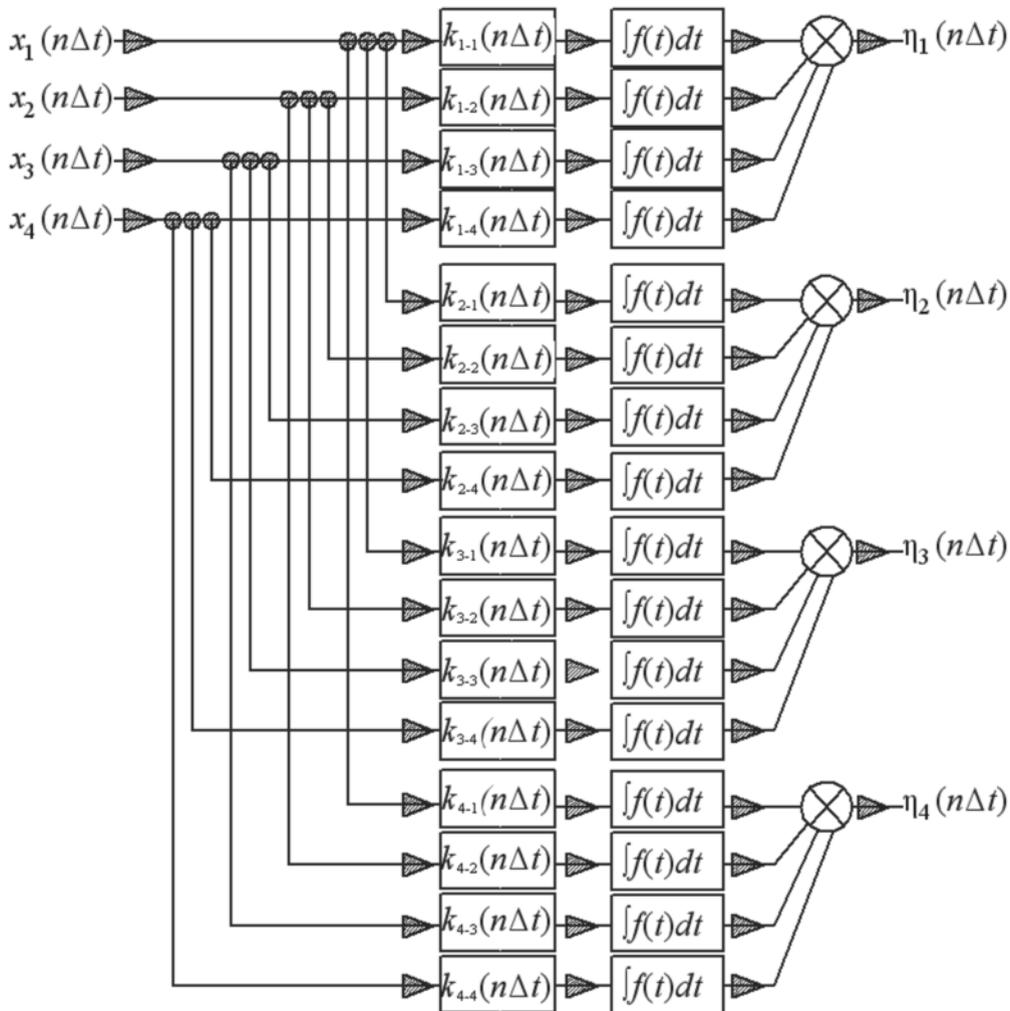


Рис. 2. Структурная схема формирующего механизма во временной области

вертикальной неровности; $i = s = 2$ – горизонтальной; $u = l = 1$ соответствует левому, а $u = l = 2$ – правому колесам. В результате такой нумерации матрица $\|\eta_{iust}(x = vt)\|$ будет иметь размерность 4×4 .

В [3] была выполнена аппроксимация аналитическими выражениями авто- и взаимокорреляционных функций и спектральных и взаимных спектральных плотностей такого многомерного случайного процесса. Приведем выражение для корреляционных функций к виду, соответствующему дифференцируемому случайному процессу $\eta_{iust}(x = vt)$:

$$R_{iust}(\tau) = S_{iust}^2 \sum_k a_{kiust}^2 \exp[-(\alpha_{kiust})^2 (n_{iust}^* \Delta x)^2] \times \cos(\beta_{kiust} n_{iust}^* \Delta x), \quad (6)$$

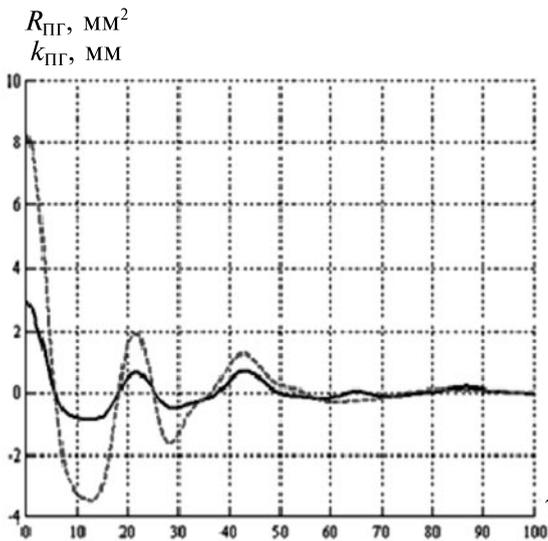
где $n_{iust}^* = n - n_{ciust}$ [м]; a_{kiust}^2 – доля дисперсии S_{iust}^2 случайного процесса, приходящаяся на

$$G_{iust}(z) = S_{iust}^2 \sum_k a_{kiust}^2 \frac{\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} \cdot \{\cos \beta_{kiust} \Delta x\} z^2 + \{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} z}{\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} z^2 + 2\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} \cdot \{\cos \beta_{kiust} \Delta x\} z + 1}. \quad (7)$$

Факторизовав (7) в программном пакете MatLAB с помощью оператора factor, найдем аналитическое выражение для элементов матрицы передаточных функций:

$$W_{iust}(z) = S_{iust} \sum_k a_{kiust} \sqrt{\frac{\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} \cdot (\cos \beta_{kiust} \Delta x) z + \{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\}}{\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} z^2 + 2\{\exp[-\alpha_{kiust}^2 (\Delta x)^2]\} \cdot (\cos \beta_{kiust} \Delta x) z + 1}}. \quad (8)$$

а)



б)

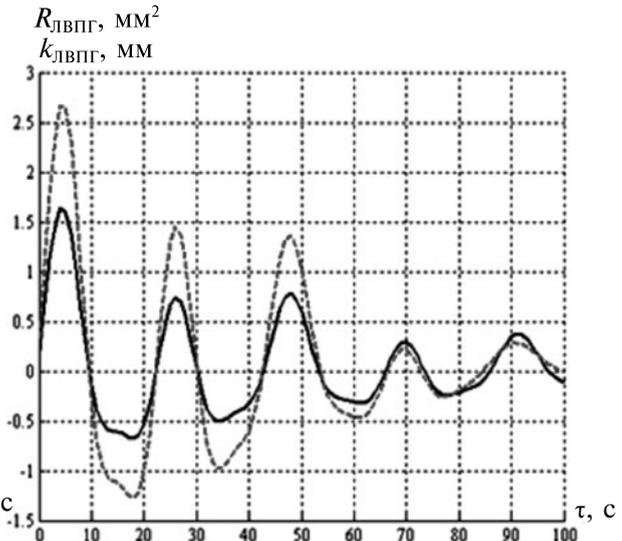


Рис. 3. Графики импульсной характеристики (—) и корреляционной функции (---): а – горизонтальной неровности правого рельса; б – взаимной корреляционной функции и импульсной характеристики вертикальной неровности левого рельса и горизонтальной неровности правого рельса

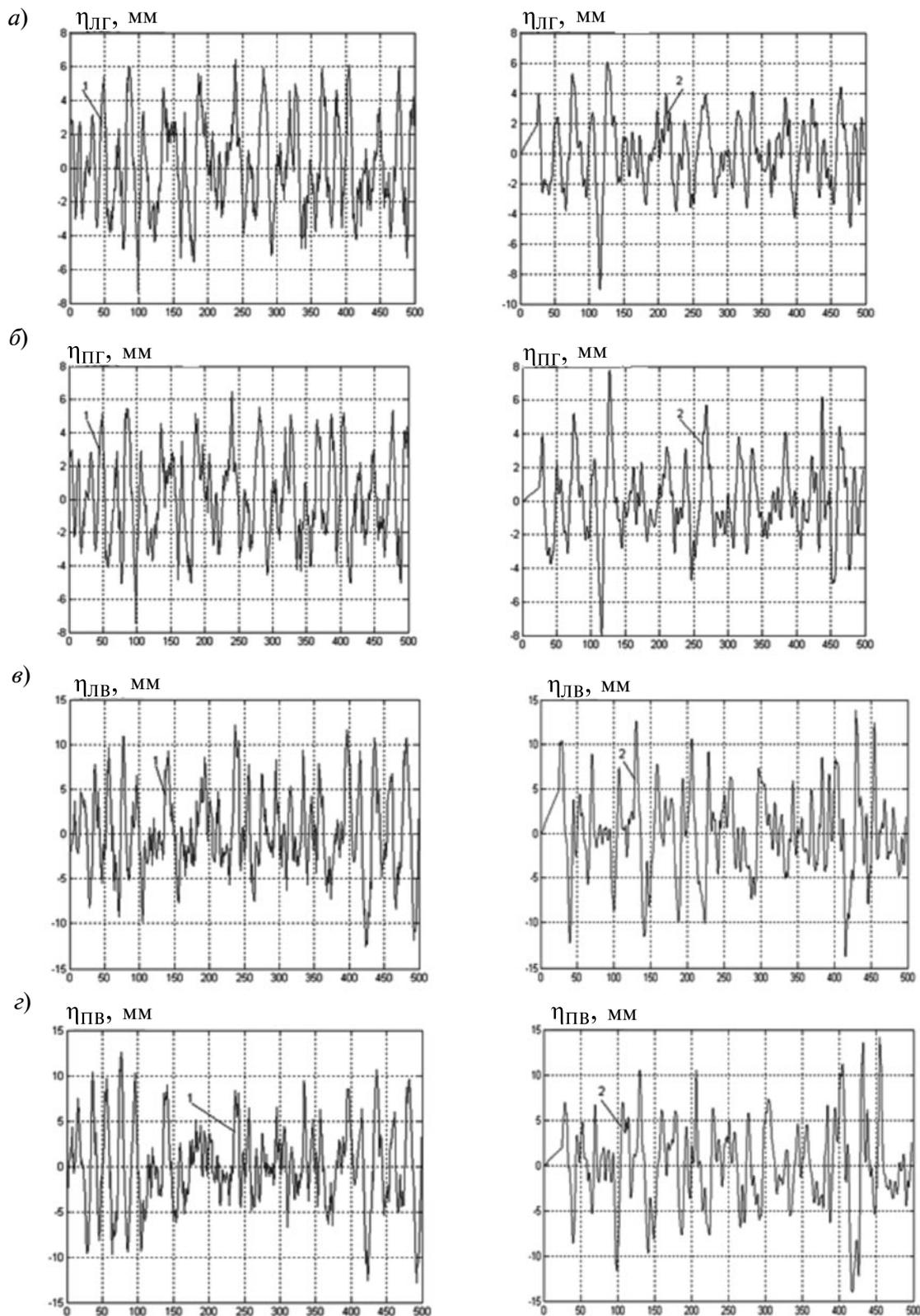


Рис. 4. Реализации четырехмерного случайного процесса геометрической неровности рельсов:
1 – сгенерированные; 2 – исходные; горизонтальные левого (а) и правого (б) рельсов;
вертикальные левого (в) и правого (г) рельсов

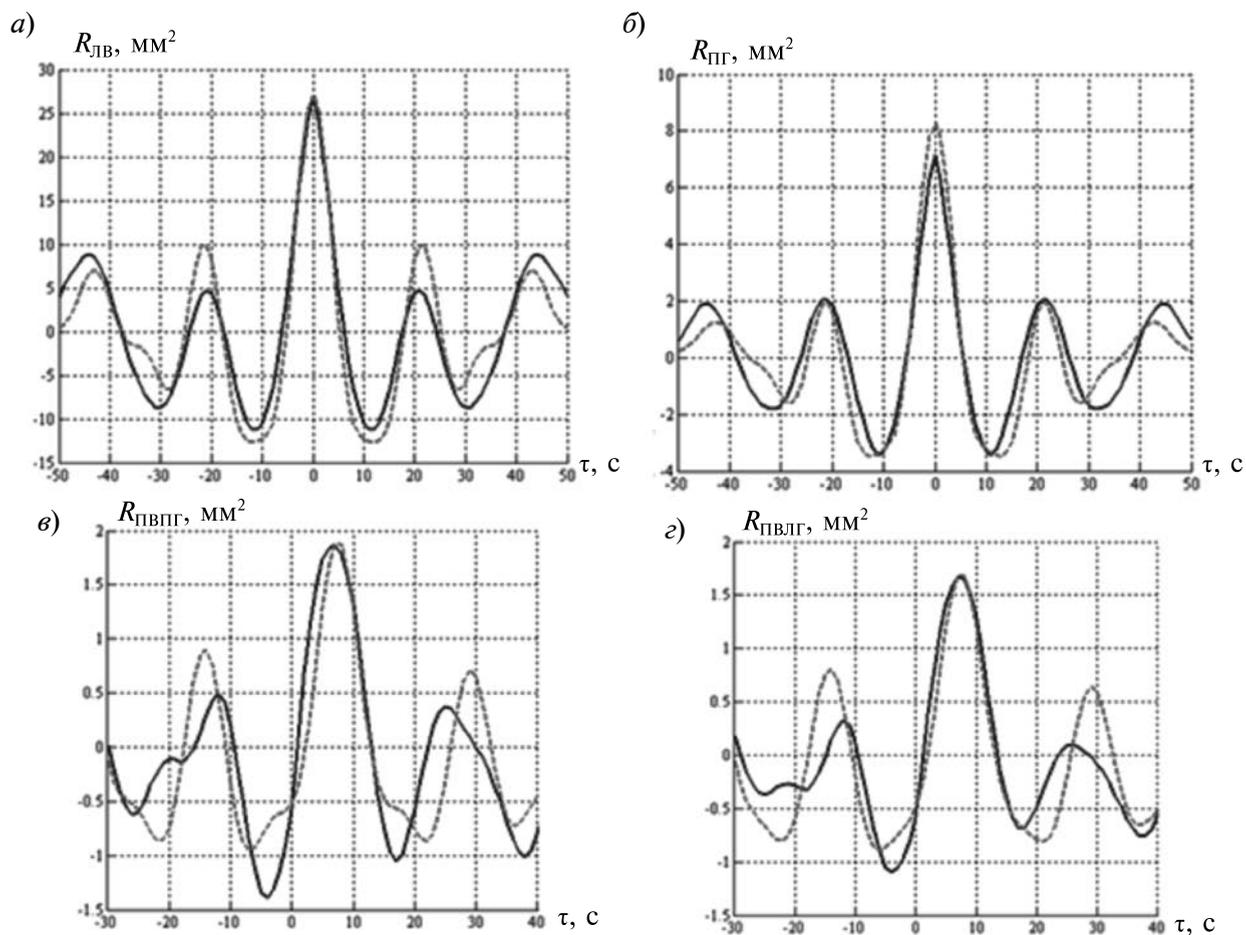


Рис. 5. Автокорреляционные функции неровностей пути: левого рельса вертикальная (а) и правого рельса горизонтальная (б); взаимокорреляционные функции между правой вертикальной и горизонтальной неровностью рельсов (е); правой вертикальной и левой горизонтальной неровностью рельсов (е): сгенерированные (—); по аналитическому выражению (---)

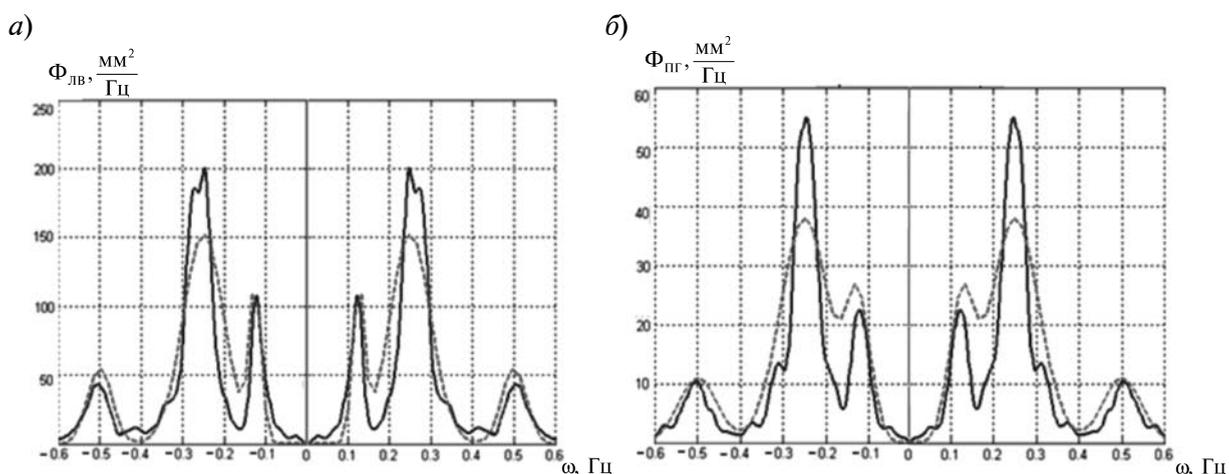


Рис. 6. Спектральные плотности неровностей пути левого рельса вертикальных (а) и правого рельса горизонтальных (б): сгенерированные (—); по аналитическому выражению (---)

Выполнив обратное z -преобразование для $W_{iu}(z)$ с помощью команды `iztrans`, перейдем к матрице импульсных характеристик:

$$\begin{aligned}
 k_{iust}\{n\Delta x\} &= S_{iust} \sum_k a_{kiust} \times \\
 &\times \left\{ \frac{\exp(\alpha_{kiust}^2 \Delta x^2) \cos[\beta_{kiust}(n\Delta x - x_{ciust})]}{\exp(\alpha_{kiust}^2 \Delta x^2)^{[(n+1)\Delta x - x_{ciust}]}} \right\} = \\
 &= S_{iust} \sum_k a_{kiust} \exp(\alpha_{kiust}^2 \Delta x^2)^{-[(n+1)\Delta x - x_{ciust}]} \times \\
 &\times \cos[\beta_{kiust}(n\Delta x - x_{ciust})]; \\
 &(n = 1, 2, \dots, N; \Delta x = vT).
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Сравнение графиков импульсных характеристик, построенных по этому выражению, и корреляционных функций по (6) со значениями параметров, приведенными в [3], свидетельствует о том, что эти про-

цессы достаточно близки. Отличие между ними состоит в том, что вначале затухание импульсных характеристик происходит быстрее, чем корреляционных функций. Затем при $n \geq 50$ это затухание замедляется. Здесь $\Delta t = 0,185$ с, как и в работе [3]. Для примера на рис. 3 приведено такое сравнение для автокорреляционной функции и импульсной характеристики горизонтальной неровности правого рельса и взаимной корреляционной функции и импульсной характеристики вертикальной неровности левого и горизонтальной неровности правого рельсов.

По найденным импульсным характеристикам с использованием интеграла свертки была выполнена генерация многомерного случайного процесса во временной области по схеме 2. Результаты генерации одной из

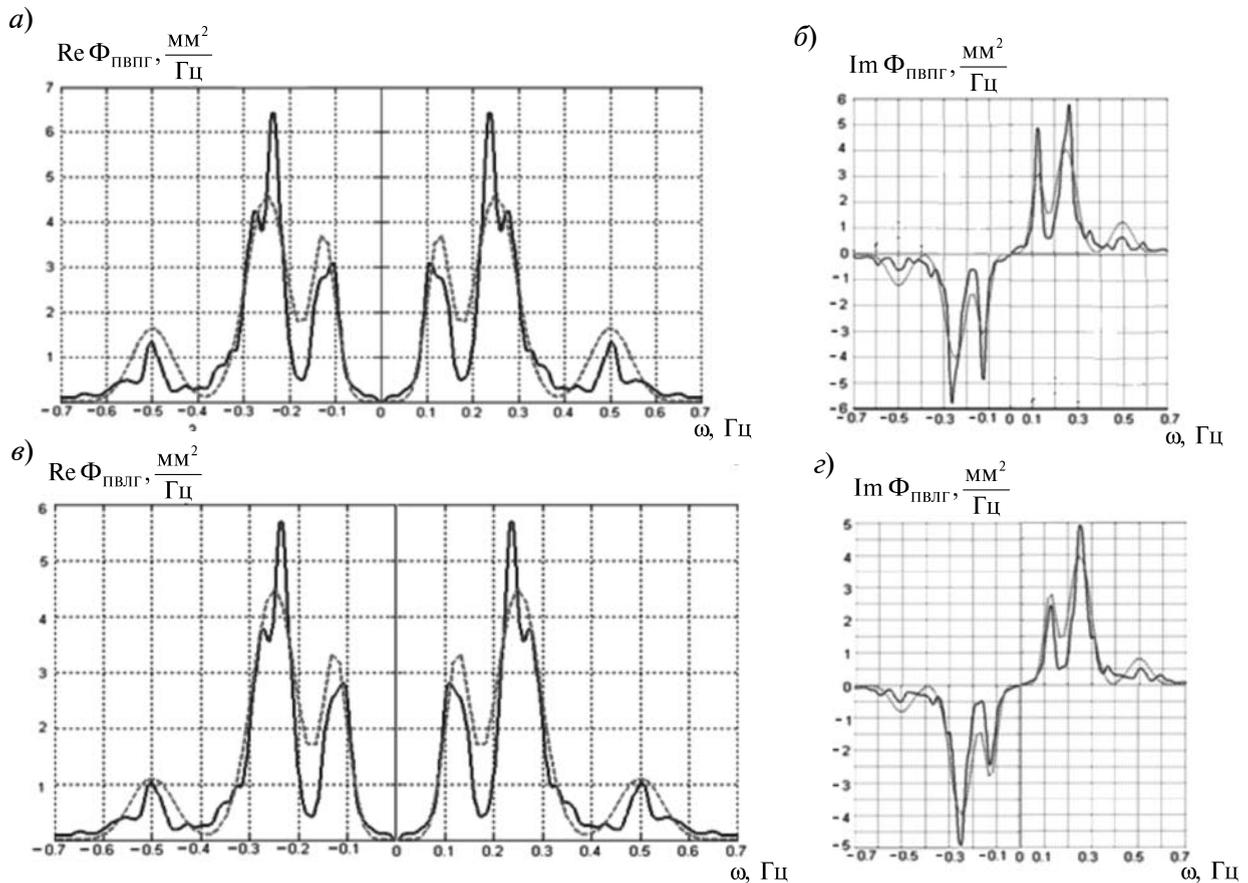


Рис. 7. Составляющие взаимной спектральной плотности между правой вертикальной и правой горизонтальной неровностями рельсов: а – вещественная; б – мнимая и составляющие взаимной спектральной плотности между правой вертикальной и левой горизонтальной неровностями рельсов: в – вещественная; з – мнимая; сгенерированные (—); по аналитическому выражению (---)

совокупностей реализаций четырехмерного случайного процесса геометрических неровностей пути (рис. 4), выполненные по рассмотренному алгоритму, показывают, что сгенерированные случайные процессы «в среднем» близки к исходным.

Для более подробного сравнения выполним корреляционный и спектральный анализ сгенерированных случайных процессов по методике, изложенной в [3], и сравним их с графиками заданных корреляционных функций и спектральных плотностей реального рельсового пути, приведенных в [3].

Для примера на рис. 5 приведены некоторые графики для авто- и взаимокорреляционных функций, а на рис. 6 и 7 соответствующие им авто- и взаимоспектральные плотности. Эти графики, построенные по

сгенерированным реализациям, имеют удовлетворительную сходимость с заданными. Некоторое расхождение между ними объясняется особенностями функционирования генераторов белого шума, а также погрешностями спектрального анализа.

Таким образом, в работе предложен алгоритм генерирования многомерной геометрической неровности рельсового пути. Используя этот алгоритм можно генерировать такую неровность при различных скоростях движения с любой длиной реализации и шагом дискретизации. Это позволяет численно решать во временной области многомерные задачи динамики подвижного состава с нелинейными характеристиками рессорного подвешивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матыаш И., Шильханек Я. Генератор случайных процессов с заданной матрицей спектральных плотностей // Автоматика и телемеханика. 1960. № 1.

2. Савоськин А.Н., Поляков А.И. Моделирование эквивалентных неровностей пути для

исследования колебаний подвижного состава // Соискатель. 2005. № 1.

3. Савоськин А.Н., Ромен Ю.С., Акишин А.А. Характеристики возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник ВНИИЖТа. 2013. № 12.

REFERENCES

1. Matyash I., Shilkhanek Ya. Generator sluchaynykh protsessov s zadannoy matritsey spektralnykh plotnostey [The random process with a predetermined matrix of spectral densities]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1960, No. 1. (rus)

2. Savoskin A.N., Polyakov A.I. Modelirovaniye ekvivalentnykh nerovnostey puti dlya issledovaniya

kolebaniy podvizhnogo sostava [Modeling the rough equivalent to the study of oscillations of the rolling stock]. *Soiskatel* [Applicant], 2005, No. 1. (rus)

3. Savoskin A.N., Roman Yu.S., Akishin A.A. Kharakteristiki vozmushcheniy, vyzyvayushchikh kolebaniya relsovykh ekipazhey [Features disturbances causing vibrations of railway vehicles], *Vestnik VNIIZhTa*, 2013, No. 12.

АКИШИН Александр Александрович – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения.

127994, Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

AKISHIN Alexandr A. *Moscow State University of Railway Engineering.*

127994, Obraztsova Str. 9 b.9, Moscow, Russia.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич – профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

127994, Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

SAVOSKIN Anatoly N. *Moscow State University of Railway Engineering.*

127994, Obraztsova Str. 9 b.9, Moscow, Russia.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.7

УДК 004.942

В.В. Чуркин

ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКТА ЗИП С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

V.V. Churkin

ESTIMATION AND OPTIMIZATION OF SPARE PARTS KIT USING THE METHOD OF STATISTICAL MODELING

Рассмотрена актуальная задача оценки и оптимизации запасов в комплекте ЗИП с учетом прямого включения комплекта ЗИП в модель надежности системы методом статистического моделирования.

КОМПЛЕКТ ЗИП; МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ; ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКТА ЗИП; ОЦЕНКА КОМПЛЕКТА ЗИП.

The article considers a topical problem of the evaluation and optimization of stocks in the set of spare parts taking into account the direct connection of the set to the model of spare parts kit using the method of statistical modeling. The Monte Carlo method has not been used to design optimal sets of spare parts due to the lack of sufficient literature. It is not still well defined how to apply the Monte Carlo method in this area. The given article provides issues how to apply the Monte Carlo method to solve the given problem.

SET OF SPARE PARTS; A METHOD OF STATISTICAL MODELING; SPARE PARTS KIT OPTIMIZATION; SPARE PARTS KIT EVALUATION.

На сегодняшний день актуальна задача оценки надежности изделий электронной техники, использующих комплект запасного имущества и принадлежностей (ЗИП). Это связано в первую очередь с пониманием несовершенства методик расчета надежности изделий при наличии ЗИП, которые используются в промышленности и поддерживаются авторитетом действующих нормативных документов уровня ГОСТ и РД [1, 2].

Согласно руководящим документам комплект ЗИП создается, с одной стороны,

для обеспечения надежности, поддержания работоспособности (безотказности, готовности), выполнения требований к надежности. С другой стороны, он нужен для обеспечения ремонтпригодности, проведения технического обслуживания в интересах поддержания работоспособности. При этом количественный состав комплекта ЗИП должен рассчитываться с учетом требований по надежности [3].

На вопрос о том, каким образом сформировать комплект ЗИП, есть ответ в нормативных документах: предлагается раз-

делить задачу обеспечения надежности изделия с ЗИП на две подзадачи:

- найти связь между показателем надежности (ПН) изделия и показателем достаточности (ПД) комплекта ЗИП, далее, из требования к ПН изделия, предъявленного в техническом задании (ТЗ), вывести нормируемый ПД комплекта ЗИП;

- провести оптимизацию комплекта ЗИП по ПД по критерию минимума суммарных затрат.

Для того чтобы связать ПН изделия и ПД ЗИП в руководящих документах [2, 3] предлагаются следующие формулы:

$$K_r = K_{r, \text{ЗИП}} K_{r\infty}, \quad (1)$$

где K_r – коэффициент готовности изделия; $K_{r, \text{ЗИП}}$ – коэффициент готовности ЗИП; $K_{r\infty} = K_r$ при неограниченном ЗИП.

Формула (1) верна только для расчета показателя готовности изделия при отсутствии внутреннего резервирования. Для других случаев используется модель надежности восстанавливаемого изделия при неограниченном ЗИП, в которой проводится коррекция среднего времени восстановления по формуле:

$$\bar{T}_v = \bar{T}_{v\infty} + \Delta t_{\text{ЗИП}}, \quad (2)$$

где \bar{T}_v – среднее время восстановления; $\bar{T}_{v\infty} = \bar{T}_v$ при неограниченном ЗИП; $\Delta t_{\text{ЗИП}}$ – среднее время задержки в удовлетворении заявок на ЗЧ.

Для задания требуемого уровня $K_{r, \text{ЗИП}}$ (если он не задан в ТЗ) можно воспользоваться следующим соотношением:

$$K_{r, \text{ЗИП}}^{\text{тр}} = K_r^{\text{тр}} / K_{r\infty}. \quad (3)$$

Формулу (3) можно использовать только при выполнении двух условий: нормируется коэффициент готовности изделия и в изделии нет резервирования. В случае наличия резервирования предлагается использовать следующую формулу:

$$\Delta t_{\text{ЗИП}}^{\text{тр}} = \bar{T}_v^{\text{тр}} - \bar{T}_{v\infty}. \quad (4)$$

Формула для связи ПД выглядит следующим образом:

$$\Delta t_{\text{ЗИП}} = -\ln(K_{r, \text{ЗИП}}) / \lambda_c, \quad (5)$$

где λ_c – суммарная интенсивность отказов изделия.

Подход, взятый в руководящих документах [1, 2], при котором сначала рассчитывается ПД ЗИП, а потом с помощью него происходит корректировка ПН изделия, имеет ряд достоинств:

позволяет разделить одну сложную задачу на две более простых;

позволяет использовать все результаты современной теории надежности восстанавливаемых систем при неограниченном восстановлении;

облегчает формирование решений по применению внутреннего структурного резервирования на основе требований к показателям надежности типа $K_{r\infty}$.

Вместе с тем он имеет и существенные недостатки. Главный из них состоит в том, что такой методический прием дает приближенное значение ПН с неисследованной погрешностью. Причем никак не гарантируется знак погрешности, т. е. оценка показателя надежности может быть как сверху, так и снизу от точного значения. В некоторых случаях ошибка становится неприемлемо большой.

Очевидно, что недостатки методик расчета и оценки комплектов ЗИП приводят к ошибкам двух типов: либо к необоснованной избыточности комплектов ЗИП, либо к невыполнению требований к надежности. И первое, и второе, в конечном счете, оборачивается прямыми экономическими потерями, иногда весьма значительными, а в ряде случаев и другими не менее ощутимыми потерями (престижа, утратой позиций на внутреннем и международном рынке и пр.).

Одновременно в сложившейся практике разработки технических систем попытка использования приближенной методики привела к тому, что в ТЗ на разработку задаются требования к надежности изделия (чаще всего средняя наработка до отказа – T_0 или вероятность безотказной работы – $P(t)$) и требование к ПД комплекта ЗИП. Это происходит потому, что для обычно нормируемого ПН изделия – показателя безотказности T_0 невозможно вывести требование для ПД комплекта ЗИП. Допустим, проектируемое изделие представляет собой последовательную нерезервирован-

ную с точки зрения надежности систему и дано требование к T_0 , требуется вывести ограничение для ПД ЗИП. Тогда воспользуемся формулами (3) и (4), с учетом того, что $K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b}$. Положим, восстановление происходит мгновенно, тогда $K_{г\infty} = 1$ и $T_{в\infty} = 0$. Получим:

$$K_r^{тр} = \frac{T_0}{T_0 + \Delta t_{ЗИП}} = \frac{T_0}{T_0 - \ln(K_r^{тр}) / \lambda_c} = \frac{1}{1 - \ln K_r^{тр}}, \quad (6)$$

где $\lambda_c = \frac{1}{T_0}$.

Так как (6) не имеет решения, следовательно, невозможно вывести требование к ПД ЗИП, имея лишь требование к T_0 изделия. Аналогичные выводы справедливы и в случае если нормируется ВБР изделия.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что тезис, приведенный в [3], о том что количество ЗЧ в комплекте ЗИП должно рассчитываться с учетом предъявленных требований по надежности изделия выполняется только в том случае, если задан K_r – комплексный показатель безотказности и ремонтпригодности или показатель ремонтпригодности – T_b , что иллюстрирует рис. 1.

Поскольку основными нормируемыми в ТЗ показателями надежности изделия явля-

ются показатели безотказности T_0 или $P(t)$, то в этом случае для задания требований к ЗИП дополнительно нормируется T_b либо ПД ЗИП. Поэтому на простой с виду вопрос о том, для чего же создается комплект ЗИП, непросто ответить: то ли для улучшения показателей безотказности изделия (но в этом случае неясна связь между показателем безотказности и ПД, с помощью которого формируется ЗИП), то ли для улучшения показателей технического обслуживания.

Все перечисленные выше недостатки обусловили потребность в разработке нового раздела теории надежности, который исключал бы ошибки, содержащиеся в приближенной методике, широко применяемой в настоящее время в промышленности [4]. Идея разработки нового подхода к учету влияния ЗИП состоит в прямом включении комплекта ЗИП в модель надежности «изделие – комплект ЗИП» [4, 5]. В этом случае комплект ЗИП рассматривается как ресурс, предназначенный для повышения надежности системы «изделие – комплект ЗИП».

В модели надежности учитываются особенности стратегии пополнения запасов, ее параметры, структура обслуживаемой системы и структура системы ЗИП, условия хранения запасов, многофункциональность изделия, возможности реконфигурации структуры, неодинаковые условия

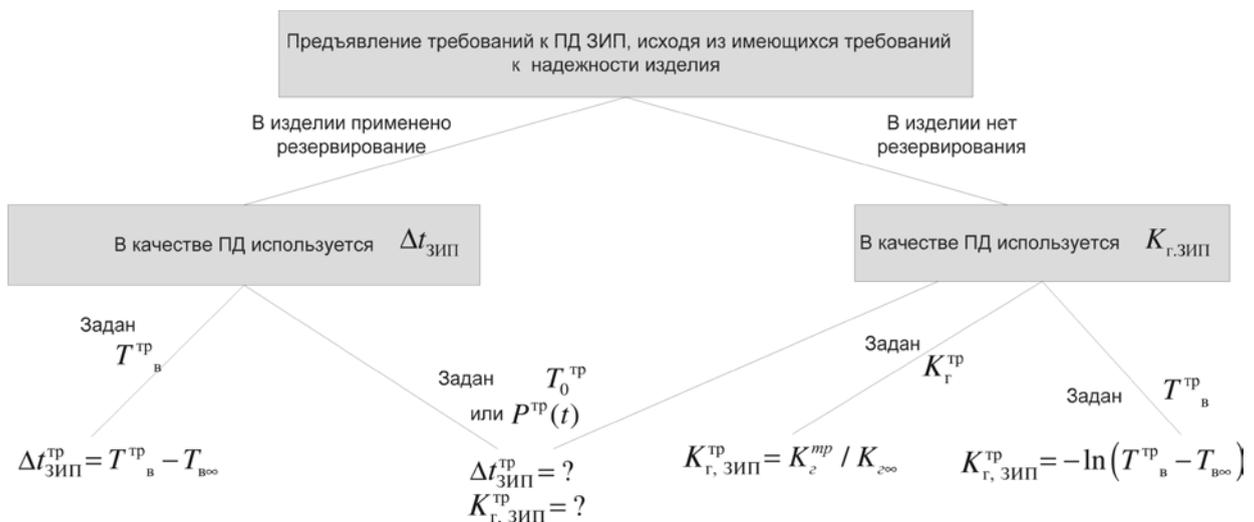


Рис. 1. Механизм предъявления требований к комплекту ЗИП

доступности запасов для различных подсистем, приоритетность доступа к запасам со стороны подсистем и функционально самостоятельных операций; возможности маневрирования ресурсами, в частности, возможности реконфигурации (перевода части работоспособных, но не участвующих в функционировании элементов деградированной структуры в состав комплекта ЗИП) и пр.

При прямом включении ЗИП в модель надежности отпадает необходимость в вычислении показателей достаточности: для задания требований к ЗИП достаточно лишь одного показателя безотказности T_0 или $P(t)$. Показатели достаточности могут рассчитываться только для сведения и для планирования работы системы технического обслуживания.

На рис. 2 схематично изображены два подхода к решению задачи обеспечения надежности изделия с учетом ЗИП: наверху – точная модель надежности «изделие – комплект ЗИП»; внизу – приближенная модель надежности, согласно действующим нормативным документам.

Очевидно, что точная модель «изделие – комплект ЗИП» не обладает универсальностью, присущей приближенной модели. Это происходит из-за многообразия исходных структур резервирования изделия. Количество различных применяющихся на практике структур резервирования достаточно велико, поэтому ядром нового раздела является некоторый набор типовых, наиболее часто используемых моделей структур для различных стратегий пополнения запасов [6].

Для поиска вероятностных характеристик моделей структур ядра могут использоваться как аналитические методы (метод декомпозиции, логико-вероятностный метод, метод Марковских графов аппарата системы дифференциальных уравнений Колмогорова), так и метод статистического моделирования (МСМ). Сложность применения аналитических методов для нахождения требуемых характеристик зависит от принятой стратегии пополнения ЗИП, от типа внутренней структуры изделия и в некоторых случаях может быть неприемле-

мой. Альтернативный способ нахождения численных значений показателей надежности – метод статистического моделирования.

Для расчета надежности можно выделить несколько широко используемых программных пакетов: отечественные «РОКЗЭРСИЗ», «АСОНИКА-К», «Арбитр»; зарубежные Relex, Windchill. Зарубежные программные пакеты не предназначены для оценки и оптимизации комплектов ЗИП, вообще на Западе количество запасных частей в комплекте определяется «на глазок» [7]. В ППП «РОКЗЭРСИЗ», разработанной 22 ЦНИИ МО РФ, реализована программная поддержка прямой и обратной задач оптимизации комплекта ЗИП по критерию достаточности в соответствии с [1, 2]. В ПК «Арбитр» не предусмотрено решение задач, связанных с использованием комплекта ЗИП. В ПК «Асоника-К-ЗИП» реализована возможность оценки и оптимизации комплекта ЗИП в соответствии с [1, 2]. С помощью ПК «Асоника-К-РЭС» нами [8] была произведена оценка надежности системы «изделие – комплект ЗИП» с помощью МСМ. По полученным результатам МСМ признан как наиболее перспективный метод расчета систем вида «изделие – система ЗИП» [8].

Что касается применения метода статистического моделирования (МСМ), то в современной теории надежности он находит применение при оценке надежности структурно-сложных восстанавливаемых систем, где получение решения аналитическими методами затруднено. К достоинствам метода можно отнести универсальность и слабую зависимость трудоемкости расчетов от типа структуры изделия. К недостаткам метода следует отнести возрастание погрешности и трудоемкости расчетов при оценке малых вероятностей.

Для проектирования оптимальных комплектов ЗИП МСМ до последнего времени не использовался в связи с тем, что, как указывалось выше, история публикаций по актуальной проблеме оценки надежности систем с учетом ЗИП насчитывает немногим более 10 лет. Применение МСМ в этой области еще недостаточно проработано,

а известные публикации на эту тему, например [8], ограничивались лишь нахождением оценки показателя ВБР на простом примере и сравнением с аналитическим решением. Между тем возникают вопросы при использовании МСМ для решения задачи оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности:

- Имеет ли место в данном случае «проклятие размерности»: как влияет на сложность вычислений МСМ количество СЧ в изделии?

- И если да, то имеет ли смысл проводить редукцию исходной структурно-сложной схемы изделия аналитическими методами?

- Как определяется необходимая точность моделирования?

Для того чтобы ответить на эти вопросы далее на конкретном примере рассматривается актуальная задача оценки и оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности с помощью МСМ. В качестве примера для расчета ЗИП взята система управления технологическими средствами блока АЭС [6]. Аналитическое решение данной задачи с помощью программы «Интеллект-ЗИП» (описание возможностей программы при-

ведено в [6, 9]), в которой заложена точная математическая модель «изделие – комплект ЗИП», приведено в [5, 6]. По сравнению с работой [5], в которой проведен сравнительный анализ результатов, полученных с применением аналитического метода и МСМ на том же примере, область исследований автором была расширена.

Пример расчета и оптимизации комплекта ЗИП с помощью МСМ

Описание системы. Система управления технологическими средствами блока АЭС (СУ ТС БАЭС) представляет собой сложный комплекс программно-технических средств (ПТС), предназначенный для надежного и безопасного автоматизированного управления технологическими средствами БАЭС в нормальных и аварийных режимах. Одна ветвь этой 7-уровневой иерархической системы содержит 41 элемент 18 типов. Средняя наработка системы до отказа без учета структурного резервирования равна 89 550 ч.

По условиям проектирования дается оценка надежности одной ветви иерархической системы (ветвью считается часть системы управления, соединяющая один ис-

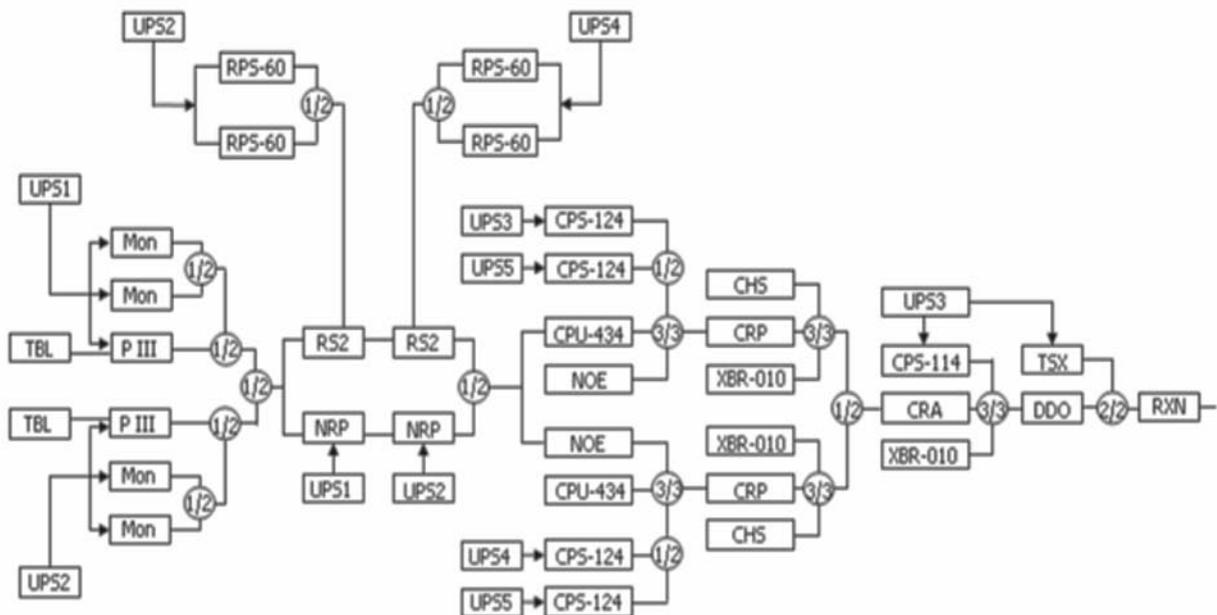


Рис. 3. Структурно-функциональная схема расчета надежности

Таблица 1

Перечень составных частей СУ ТС БАЭС

	Наименование	Обозначение на схеме	Количество	Изготовитель ГОСТ, ТУ	$\lambda \cdot 10^6$, 1/ч	Цена, тыс. руб.
1	ПЭВМ на базе ПИИ	ПИИ	2	Marvel (Intel)	20,49	68,88
2	Монитор 18,1" TFT-LCD	Мон	4	ICOS (AAEON)	40,00	74,892
3	Процессор 140 CPU 434	CPU-434	2	Schneider Electric	4,15	145,003
4	Трекбол TBL 50F1	TBL	2	Prosoft (Advantech)	10,00	9,270
5	Уст. панель 140ХВР-01000	ХВР-010	3	Schneider Electric	0,17	8,688
6	Модуль дискретного вывода 140DDO353	DDO	1	Schneider Electric	4,17	15,337
7	Модуль Hot Standby 140CHS210	CHS	2	Schneider Electric	1,34	224,189
8	Модуль питания 140CPS 114	CPS-114	1	Schneider Electric	1,81	20,968
9	Модуль питания 140CPS 124	CPS-124	4	Schneider Electric	1,81	23,319
10	Модуль сети RIO гол. 140CRP932	CRP	2	Schneider Electric	1,60	34,756
11	Модуль сети RIO узл. 140CRA932	CRA	1	Schneider Electric	1,62	33,351
12	Модуль сети Ethernet 140NOE 77100	NOE	2	Schneider Electric	1,67	35,413
13	Источник питания TSX-SUP 1011	TSX	1	Merlin Gerin	4,50	4,204
14	Источник бесперебойного питания PULSAR Extreme 1500 C Rack	UPS	5	Merlin Gerin	15,00	30,002
15	Источник питания RPS-60	RPS-60	4	Prosoft (Hirschmann)	4,50	5,473
16	Комм. Ethernet RS2-FX/FX	RS2	2	Prosoft (Hirschmann)	1,61	64,368
17	Оптический повторитель MB+ 490 NRP253	NRP	2	Schneider Electric	2,72	29,962
18	Реле RXN-41G12BO	RXN	1	Telemecanique	0,05	0,600

полнительный модуль с верхним уровнем иерархической системы). Рассматриваемая ветвь управления является однофункциональной системой, все ее элементы используются для выполнения единственной функционально самостоятельной операции (ФСО). Структурно-функциональная схема расчета надежности этой ветви приведена на рис. 3.

Постановка задачи. С помощью введе-

ния комплекта ЗИП-О необходимо обеспечить значение вероятности безотказной работы (ВБР) системы:

не ниже 0,95 – вариант 1;

не ниже 0,99 – вариант 2.

Оптимизацию следует проводить по критерию минимума стоимости комплекта ЗИП-О (прямая задача оптимизации) при периодическом пополнении запасов. Период пополнения запасов в комплекте ЗИП

$T = 1$ год = 8760 ч. Расчетное время функционирования системы равно $t = 2$ года = 17520 ч.

Требуется получить решение (оптимальный комплект ЗИП, удовлетворяющий предъявленным требованиям) с помощью метода статистического моделирования (МСМ), сравнить полученные результаты при разном количестве испытаний методом Монте-Карло с точным аналитическим решением.

Исходные данные:

количество различных по типу СЧ системы $m = 18$;

интенсивность отказов i -го элемента λ_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

стоимость i -го элемента c_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

количество СЧ элементов i -го типа n_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

период пополнения ЗИП для всех элементов $T = 1$ год = 8760 ч;

расчетное время функционирования, за которое рассчитывается ВБР, $t = 17520$ ч.

Решение. Получение оценки ВБР системы при выбранном составе комплекта ЗИП $P(t, L_1, L_2, \dots, L_m)$ МСМ предполагает следующие шаги:

1. Моделирование $\sum_{i=1}^m n_i = 41$ наработок до отказа элементов изделия.

2. Моделирование $\sum_{i=1}^m L_i$ наработок до отказа запасных элементов изделия;

3. Анализирование: произошел отказ системы или нет по логической функции работоспособности системы (ЛФРС), накопление статистики.

4. Для получения требуемой точности ВБР шаги 1-3 повторяются.

Проблема состоит в том, что этим алгоритмом можно воспользоваться для оценки надежности ограниченного набора вариантов различных комплектов ЗИП. Если допустить, что по каждой СЧ будет не менее пяти ЗЧ в комплекте ЗИП, то количество различных вариантов комплектации ЗИП будет равно $6^{18} \approx 10^{14}$.

Фактически каждый новый вектор L в приведенном выше алгоритме требует своей оценки ВБР. А для скольких значений век-

тора L нужно рассчитать ВБР? Если только для выполнения алгоритма оптимизации, то количество шагов в алгоритме оптимизации равно количеству ЗЧ в оптимальном комплекте: на каждом шаге рассчитывается 18 значений ВБР по приведенному выше алгоритму.

Есть и другой способ нахождения оценки ВБР системы: сначала применить аналитические методы для упрощения структурно-сложной схемы на ряд более простых типовых структур, а затем с помощью МСМ получить оценки ВБР этих типовых структур, которые с помощью преобразования дадут искомую ВБР системы. Этот способ выигрывает в трудоемкости проводимых расчетов: для того чтобы получить оценку ВБР всех возможных вариантов комплектации ЗИП необходимо рассчитать ВБР типовых структур, количество которых 6×18 . Далее рассматривается решение задачи с помощью второго способа.

Нахождение логической функции работоспособности системы (ЛФРС) и аналитического выражения для ВБР системы. Используя принцип декомпозиции (см. [10]) при анализе надежности схемы на рис. 3, осуществляем переход от сложной структуры на ряд более простых. Полученная структурно-надежностная схема приведена на рис. 4.

На рисунке прямоугольниками выделены различные по типу СЧ – всего 18 различных по типу СЧ прямоугольников. ЛФРС принимает вид:

$$f(X) = \bigcap_{i=1..4} x_i (x_5 x_6 \cup x_7) \bigcap_{i=8..18} x_i, \quad (7)$$

где $X = (x_1, \dots, x_{18})$ – вектор логических переменных, соответствующих пронумерованным на рисунке СЧ.

В каждом выделенном прямоугольнике – одна из типовых структур резервирования (нерезервированная структура, дублированная и т. д.). На рис. 4 каждая типовая структура предполагает использование запасов одного типа. Модели для типовых структур резервирования реализованы в программе «Интеллект-ЗИП», расчет может производиться аналитическим и методом Монте-Карло.

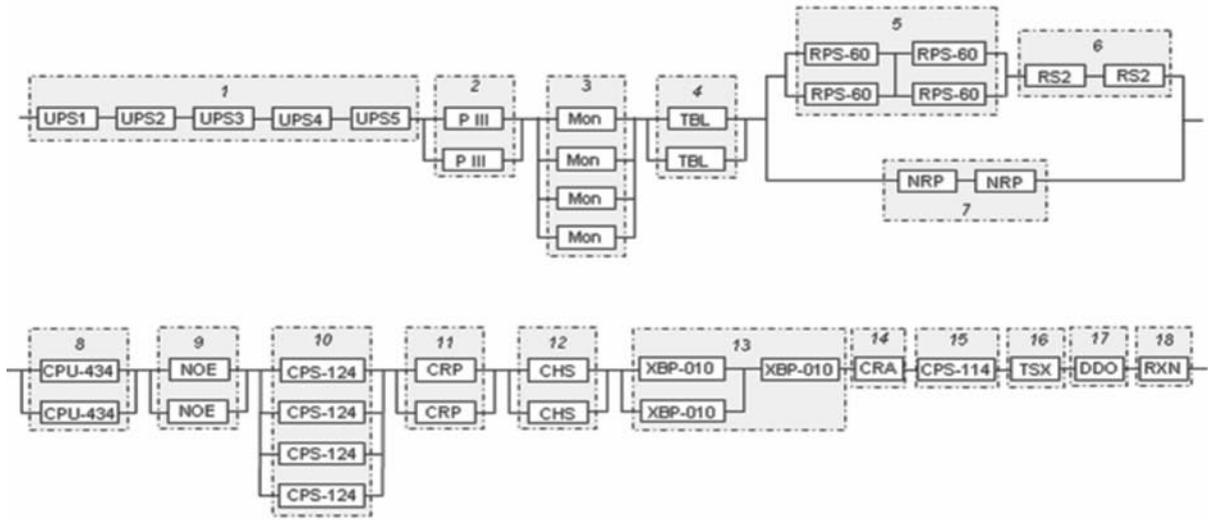


Рис. 4. Структурно-надежностная схема системы

Для упрощения дальнейших вычислений возьмем оценку снизу для ВБР – вместо (1) ЛФРС примет следующий вид:

$$f(X) = \bigcap_{i=1..18} x_i, \quad (8)$$

что соответствует последовательному соединению 18 различных по типу СЧ структур в схеме надежности.

Соответственно, ВБР системы, рассчитанная на один период пополнения комплекта ЗИП:

$$P(T, L_1, L_2, \dots, L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i^2(T, L_i), \quad (9)$$

где $L_i, i = 1..m$ – количество ЗЧ i -го типа в ЗИП; $p_i(T, L_i)$ – ВБР i -го блока будет рассчитана далее МСМ.

Поскольку $t = 2T$, то $p_i(t, L_i) = p_i^2(T, L_i)$, а ВБР системы за расчетное время функционирования

$$\begin{aligned} P(t, L_1, L_2, \dots, L_m) &= \\ &= P^2(T, L_1, L_2, \dots, L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i^2(T, L_i). \end{aligned} \quad (10)$$

Далее, для определения количественного значения ВБР типовых структур резервирования $p_i(T, L_i)$ можно применить МСМ.

Поскольку для поиска оптимального количества ЗЧ в комплекте ЗИП будет рассчитываться ВБР системы для различных вариантов L_1, L_2, \dots, L_m , то необходимо рас-

считать $p_i(T, L_i)$, где L_i принимает значения от нуля до $L_{\max} = 5$ (как правило, количество ЗЧ в комплекте ЗИП не превышает количество СЧ в системе, максимальное количество СЧ в системе – $\max_{(n_1, \dots, n_m)} = n_{i4} = 5$).

Алгоритм статистического моделирования для $p_i(T)$. Алгоритм нахождения ВБР $p_i(T)$ следующий:

- Составление ЛФРС соответствующей структуры резервирования.
- Расчет ВБР за время T по следующему алгоритму:

Цикл от 1 до N , где N – количество испытаний МСМ.

Генерирование n_i СВ времени отказа для каждого модуля в структуре с экспоненциальным законом распределения $t_l = -\ln(\alpha) / \lambda_l, l = 1..n_i, \alpha$ – СВ с равномерным распределением в интервале $[0,1]$.

Цикл от 0 до L_{\max} .
Вычисление l , такого что $t_l = \min(t_1, \dots, t_{n_i})$.

Генерирование СВ времени отказа модуля, введенного на замену $t_l = t_l - \ln(\alpha) / \lambda_l$.

Конец цикла от 1 до N .

Если ЛФРС структуры равна 0 (вычисляется подстановкой в качестве булевых переменных в ЛФРС – $x_l = \begin{cases} 0, t_l \leq T \\ 1, t_l > T \end{cases}$), то увеличение счетчика количества отказов d .

$$p_i(T) = 1 - d/N.$$

Конец алгоритма.

Алгоритм оптимизации. Алгоритм для оптимизации по критерию минимума стоимости комплекта ЗИП (прямая задача оптимизации) разработан автором и опубликован в [6]. Алгоритм аналогичен алгоритму оптимизации ЗИП по показателю достаточности, приведенному в нормативных документах [1, 2], и отличается только типом целевой функции (в [1, 2] – это ПД, в [6] – это ПН).

Необходимо обеспечить минимум критериальной (целевой) функции

$$C_{\Sigma \text{ЗИП}}^0 = \sum_{i=1}^m c_i L_i^0 = \min_{(L_1, \dots, L_m)} \sum_{i=1}^m c_i L_i$$

при ограничении $P \geq P^0$, где m – количество различных по типу ЗЧ; (c_1, \dots, c_m) – вектор стоимости запасных частей; (L_1, \dots, L_m) – вектор количества ЗЧ в комплекте ЗИП-О; P^0 – нормативное значение ВБР.

Это целочисленная задача математического программирования с сепарабельным целевым функционалом и одним сепарабельным ограничением [11]. При ее решении используется метод наискорейшего по координатного спуска, реализуемый в виде

Таблица 2

Результаты оптимизации комплекта ЗИП по уровню ВБР 0,95 с помощью МСМ (в серии из трех прогонов по $N = 10^3$ испытаний каждый)

	Наименование модуля	Оптимальный аналитический комплект	Оптимальный комплект МСМ 1	Оптимальный комплект МСМ 2	Оптимальный комплект МСМ 3
1	P III	1	1	1	1
2	Mon	1	1	1	1
3	CPU-434	0	0	0	0
4	TBL	1	0	1	1
5	XBP-010	0	0	0	0
6	DDO	1	1	1	1
7	CHS	0	0	0	0
8	CPS-114	1	1	1	1
9	CPS-124	0	0	0	0
10	CRP	0	0	0	0
11	CRA	1	1	1	1
12	NOE	0	0	0	0
13	TSX	1	1	1	1
14	UPS	3	3	3	3
15	RPS-60	0	1	1	0
16	RS2	1	1	1	1
17	NRP	1	1	1	1
18	RXN	0	0	0	0
Стоимость комплекта по отношению к стоимости системы, %		21,77	21,57	22,06	21,77
Количество ЗЧ		12	12	13	12
ВБР аналитич.		0,952	0,939	0,963	0,952
ВБР _{МСМ}			0,950	0,955	0,956

«пошаговой» оптимизации, при которой на каждом следующем шаге расчета добавляется только одна ЗЧ и только в тот запас, увеличение которого на этом шаге дает наибольший прирост показателя в расчете на единицу затрат.

Алгоритм оптимизации приведен ниже.

1. Входные данные:

вектор стоимости ЗЧ (c_1, \dots, c_m);

рассчитанные МСМ (см. выше алгоритм статистического моделирования) $p_i(t)$;

функция ВБР системы (см. выше нахождение логической функции) $P(t, L_1, L_2, \dots,$

$$L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i(t, L_1, L_2, \dots, L_m);$$

P^0 – граничное значение ВБР.

2. Расчет базового комплекта $P(t, L_1, \dots, L_m)$ (при $L_i = 0$, где $i = 1..m$).

3. Цикл по i от 1 до m

$$R_i = (P(t, L_1, \dots, L_i+1, \dots, L_m) - (P(t, L_1, \dots, L_m)))/c_i.$$

4. Нахождение $L_j = \max_{j=1..m} R_j$.

5. $L_j = L_j + 1$.

6. Если $P(t, L_1, \dots, L_m) < P^0$, то переход к 3.

7. На выходе алгоритма – оптимальный комплект (L_1, \dots, L_m), удовлетворяющий предъявленным по надежности требованиям.

Результаты. В табл. 2 приведены результаты работы МСМ вариант 1 по уровню ВБР 0,95.

В столбике «Оптимальный аналитический комплект» – комплект ЗИП, рассчитанный аналитическим методом (вероятности $p_i(T)$ в этом случае рассчитывались по аналитическим формулам ядра, формулы приведены в [6]). Строка таблицы «ВБР аналитич.» – значение ВБР системы для данного комплекта, рассчитанное аналитическим методом.

Согласно данным табл. 2, при выбранном количестве испытаний МСМ ($N = 10^3$) оптимальное аналитическое решение получено в одном прогоне из трех произведенных. При увеличении количества испытаний МСМ до $N = 10^4$ сходимость к аналитическому результату 100 %: в серии из 10 прогонов оптимальный аналитический комплект был получен 10 раз.

В табл. 3 приведены результаты работы

алгоритма оптимизации по уровню 0,99 – вариант 2. В этот раз 100 % сходимость к аналитическому решению была получена для $N = 10^6$. При меньшем количестве испытаний МСМ получилось, что фактическое значение ВБР меньше значения, рассчитанного МСМ. Такой знак ошибки при моделировании обусловлен работой алгоритма оптимизации, в котором на каждом шаге оптимизации добавляется та ЗЧ, значение критерия (рассчитанного МСМ и обладающего статистической погрешностью) которой больше остальных.

Очевидно, что количество испытаний МСМ, минимально необходимое для получения устойчивого оптимального комплекта по уровню ВБР 0,95 уже недостаточно для уровня 0,99. Поэтому ниже определяется необходимое количество испытаний для получения оценки с требуемой точностью.

Точность рассчитываемого МСМ показателя. Необходимо определить точность ВБР, полученных МСМ. Поскольку требуется оптимизировать комплект ЗИП по уровню ВБР_{системы} = 0,99, то возьмем ошибку определения ВБР МСМ, равную 10^{-3} . Поскольку в данном примере имеет место последовательная схема соединения всех элементов, то ошибка для ВБР 18 различных по типу составных частей определяется из условий:

$$\begin{cases} \sqrt[18]{0,99} + \varepsilon = \sqrt[18]{0,991} \\ \sqrt[18]{0,99} - \varepsilon = \sqrt[18]{0,989} \end{cases}$$

$$\text{Отсюда } \varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Данный подход можно обобщить: ошибка ε определяется исходя из нормативного значения ВБР системы и с учетом логической функции работоспособности.

Ошибка для ВБР в соответствии с теоремой Муавра–Лапласа оценивается по следующей формуле:

$$\varepsilon \leq u_\alpha \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}},$$

где u_α – квантиль нормального распределения по уровню α ; P – ВБР, рассчитанная методом Монте-Карло; N – количество испытаний по схеме Бернулли.

Далее, для получения ВБР с необходимой точностью возьмем $u_\alpha = 3$ ($\alpha = 0,001$: правило

Таблица 3

Результаты оптимизации комплекта ЗИП по уровню ВБР 0,99 с помощью МСМ при различном количестве испытаний N

	Наименование модуля	Оптимальный аналитический комплект	Оптимальный комплект							
			МСМ 1 $N=10^4$	МСМ 2 $N=10^4$	МСМ 3 $N=10^4$	МСМ 4 $N=10^5$	МСМ 5 $N=10^5$	МСМ 6 $N=10^5$	МСМ 7 $N=10^6$	МСМ 8 $N=10^6$
1	P III	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	Mon	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	CPU-434	0	1	0	0	1	0	1	0	0
4	TBL	2	1	1	2	1	2	1	2	2
5	XBP-010	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	DDO	2	1	2	2	2	2	2	2	2
7	CHS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	CPS-114	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	CPS-124	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	CRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CRA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	NOE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	TSX	2	1	2	2	1	2	1	2	2
14	UPS	5	4	4	5	4	5	4	5	5
15	RPS-60	2	1	1	1	1	1	1	2	2
16	RS2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	NRP	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	RXN	1	0	1	1	0	1	0	1	1
Стоимость комплекта по отношению к стоимости системы, %		36,74	40,98	34,37	36,45	41,79	36,74	36,74	36,74	36,74
Количество ЗЧ		24	19	21	23	20	24	24	24	24
ВБР аналитич.		0,990	0,989	0,988	0,989	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
ВБР _{МСМ}		0,990	0,991	0,990	0,990	0,991	0,990	0,990	0,990	0,990

«трех сигм») и определим число N .

Решая неравенство относительно N , получим необходимое количество испытаний МСМ для выбранной точности: $N \geq u_{\alpha}^2 \frac{P(1-P)}{\varepsilon^2} = 2 \cdot 10^6$, что подтверждается ранее полученными практическими результатами.

Необходимое количество испытаний МСМ для получения решения с требуемой точностью не является препятствием к его применению. Этот вывод можно распространить и на большую часть проектируемых систем, поскольку структура изделия, количество СЧ в примере и нормативное значение ПН является типовым.

Используемые в настоящее время в промышленности методики расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии ЗИП являются приближенными, имеющими знакопеременную погрешность, значение которой не известно как по знаку, так и по абсолютной величине. Идея разработки нового подхода к учету влияния ЗИП состоит в прямом включении комплекта ЗИП в модель надежности «изделие – комплект ЗИП» [4, 5]. Отсюда возникает совершенно новая в теории надежности задача оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности. Для ее решения в статье рассматривался метод статистического моделирования как наиболее

перспективный метод расчета систем вида «изделие – система ЗИП», по мнению авторов [8].

Использование МСМ предпочтительней после применения аналитических методов к рассматриваемой модели «изделие – система ЗИП», направленных на ее упрощение, что и было продемонстрировано на примере. Необходимое количество испытаний МСМ для получения решения с требуемой точностью не является препятствием к его применению.

Для решения поставленной задачи в разработанную ранее программу «Интеллект-ЗИП», в которой реализованы алгоритмы оценки и оптимизации комплекта ЗИП по показателям надежности или показателям достаточности, был добавлен модуль расчета ПН типовых структур резервирования методом Монте-Карло. В связи с введением нового метода расчета ПН в программу, библиотека типовых структур резервирования может быть расширена.

Дальнейшее применение метода статистического моделирования для решения задачи оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности видится в следующем:

для расширения существующей библиотеки типовых структур, что упрощает использование логико-вероятностных методов;

для верификации аналитических моделей типовых структур резервирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП // РД В 319.01.19-98.
2. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. Запасные части, инструменты и принадлежности. Основные положения // ГОСТ РВ 27.3.03–2005. М.: Стандартинформ, 2005. 37 с.
3. Запасные части, инструменты и принадлежности. Основные положения // ГОСТ В.15 705–86. М.: Госстандарт, 1986. 44 с.
4. Черкесов Г.Н. О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. Ч. 1. // Надежность. 2010. № 3. С. 29–39.
5. Черкесов Г.Н. О критериях выбора комплектов ЗИП, Надежность. 2013. № 2 (45). С. 3–18.
6. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.
7. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий // Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1981. 176 с.
8. Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП // Надежность. 2011. № 3. С. 53–60.
9. Чуркин В.В., Черкесов Г.Н. О программе расчета показателя надежности системы с прямым включением комплекта ЗИП в модель надежности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 3(80). С. 212–216.

10. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 478 с.

11. Головин И.Н., Чуварыгин Б.В., Шура-

Бура А.Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем // Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1984. 175 с.

REFERENCES

1. RD V 319.01.19-98. *Metodiki otsenki i rascheta zapasov v komplektakh ZIP* [Methods of estimating and calculating reserves in sets of spare parts]. (rus)

2. GOST RV 27.3.03–2005. *Nadezhnost voyennoy tekhniki. Otsenka i raschet zapasov v komplektakh ZIP. Zapasnyye chasti, instrumenty i prinadlezhnosti. Osnovnyye polozeniya* [The reliability of military equipment. Evaluation and calculation of reserves in the maintenance kit. Spare parts, tools and accessories. The main provisions]. Moscow: Standartinform Publ., 2005, 37 p. (rus)

3. GOST V.15 705–86. *Zapasnyye chasti, instrumenty i prinadlezhnosti. Osnovnyye polozeniya* [Spare parts, tools and accessories. fundamentals]. Moscow: Gosstandart Publ., 1986, 44 p. (rus)

4. Cherkesov G.N. O probleme rascheta nadezhnosti vosstanavlivayemykh sistem pri nalichii zapasnykh elementov [On the problem of calculating the reliability of restorable systems in the presence of spare elements], Chast 1. *Nadezhnost* [Reliability], 2010, No. 3, Pp. 29–39. (rus)

5. Cherkesov G.N. O kriteriyakh vybora komplektov ZIP [On the criteria for selecting sets of spare parts]. *Nadezhnost* [Reliability], 2013, No. 2 (45), Pp. 3–18. (rus)

6. Cherkesov G.N. *Otsenka nadezhnosti sistem s uchetom ZIP* [Evaluation of reliability of systems with the sets of spare parts]. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2012, 480 p. (rus)

7. Dzirkal E.V. Nadezhnost slozhnykh system [Reliability of complex systems]. *Biblioteka inzhenera*

po nadezhnosti [Library engineer reliability]. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1981, 176 p. (rus)

8. Zhadnov V.V., Avdeyev D.K., Tikhmenev A.N. Problemy rascheta pokazateley dostatochnosti i optimizatsii zapasov v sistemakh ZIP [Problems adequacy calculation and optimization of inventory systems sets of spare parts]. *Nadezhnost* [Reliability], 2011, No. 3, Pp. 53–60. (rus)

9. Churkin V.V., Cherkesov G.N. Programma rascheta pokazatelya nadezhnosti sistema s pryamym vklyucheniym komplekta ZIP v model nadezhnosti [About the calculation of the index system reliability with direct inclusion in the spare parts kit model of reliability], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 3 (80), Pp. 212–216. (rus)

10. Cherkesov G.N. *Nadezhnost apparatno-programmnykh komplektov* [The reliability of software and hardware]. St. Petersburg: Piter Publ., 2005, 478 p. (rus)

11. Golovin I.N., Chuvarigin B.V., Shura-Bura A.E. Raschet i optimizatsiya komplektov zapasnykh elementov radioelektronnykh system [Calculation and optimization of a set of spare components electronic systems]. *Biblioteka inzhenera po nadezhnosti* [Library engineer reliability]. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1984, 175 p. (rus)

ЧУРКИН Виталий Владимирович – старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

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

E-mail: ch07@yandex.ru

CHURKIN Vitaly V. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

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

E-mail: ch07@yandex.ru



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.8

УДК 681.51

А.П. Козионов, А.Л. Пяйт, И.И. Мохов, Ю.П. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ В ИЗМЕРЯЕМЫХ СИГНАЛАХ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДАМБ

A.P. Kozionov, A.L. Pyayt, I.I. Mokhov, Yu.P. Ivanov

RESEARCH ON GAP-FILLING ALGORITHMS FOR DIKE HEALTH MONITORING SYSTEMS

Мониторинг состояния дамб является важной и актуальной задачей. Алгоритмы мониторинга должны в режиме онлайн по сигналам с аппаратуры контроля определять аномальное состояние дамбы. Одна из серьезных проблем системы мониторинга состояния дамб, влияющая на возможность применения алгоритмов мониторинга — качество измерений датчиков. В данных встречаются пропуски, вызванные сбоями, отключениями систем передачи или сбора данных, неправильными настройками систем и другими внешними и внутренними факторами, поэтому необходимы алгоритмы улучшения качества измерений.

Предложен подход, основанный на использовании адаптивных алгоритмов восстановления пропусков в сигналах в условиях априорной неопределенности моделей сигналов. Представлены алгоритмы (на основе модели авторегрессии, метода «Гусеница-SSA», преобразования Фурье), использующие исторические данные для восстановления сигналов. Приведено описание и сравнительный анализ точности восстановления пропусков алгоритмами. Апробация алгоритмов проведена на реальных данных с дамбы, расположенной в городе Бостон, Великобритания. Результаты исследований и алгоритмические решения использованы компанией Siemens в системе мониторинга состояния дамб в рамках проекта Евросоюза UrbanFlood.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУСКОВ В СИГНАЛАХ; АВТОРЕГРЕССИЯ; ГУСЕНИЦА; СИНГУЛЯРНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ; ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ; МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ДАМБ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ.

Earthen dam (dike/levee) health monitoring is a challenging task. Monitoring algorithms have to detect anomalies in dike behavior in on-line mode basing on measurement collected from the sensors installed in the dike. One of the important monitoring-related challenges for dike health monitoring is the quality of sensors measurements. There are often gaps that occur due to failures, outages of transmission or data collection systems, incorrect configurations of systems and other internal and external factors, therefore it is necessary to improve the quality measurement using specific algorithms. The proposed approach is based on adaptive algorithms filling in gaps in sensor measurements in the conditions of a priori uncertainty of signals models. The algorithms (based on the autoregressive model, Caterpillar-SSA, Fourier transform) presented in this paper use historical data for signal reconciliation. The description and analysis of the algorithms are also included in the paper. The algorithms have been tested at the Boston dike, Great Britain. The research findings and algorithms are implemented by Siemens in the UrbanFlood Early Warning System.

GAP-FILLING; MEASUREMENT RECONCILIATION; AUTOREGRESSIVE MODEL; SPECTRUM SINGULAR ANALYSIS; FOURIER TRANSFORM; DIKE HEALTH MONITORING; INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING.

Мониторинг состояния дамб — важная и актуальная задача. Алгоритмы монито-

ринга состояния дамб должны в режиме онлайн по сигналам с аппаратуры контроля

определять аномальное состояние дамбы. Для оценки состояния дамб применяются алгоритмы машинного обучения, анализирующие частотно-временные свойства сигналов (вейвлет-преобразование, оконное преобразование Фурье и т. д.) [1–4]. Для корректного функционирования алгоритмов необходимы данные, не содержащие пропусков в измерениях, иначе результат обучения алгоритмов и оценки состояния дамбы будут неверными. Одной из серьезных проблем систем мониторинга состояния дамб является качество измерений датчиков, вызванное сбоями, отключениями систем передачи или сбора данных, неправильными настройками систем и другими внешними или внутренними факторами, поэтому необходимы алгоритмы улучшения качества измерений. Восстановление пропусков измерений представляет собой наиболее сложную задачу проблематики улучшения качества измерений. Настоящая проблема актуальна не только для рассматриваемой системы, но и для других систем, имеющих дело с полевыми измерениями: систем водоснабжения [5], метеорологических систем [6] и т. д.

Пропуски в измерениях могут варьиро-

ваться от нескольких минут до нескольких дней. Для обучения алгоритмов мониторинга дамб (алгоритмов на основе машинного обучения) необходимы исторические данные. Алгоритмы восстановления пропусков должны оценивать пропущенные значения сигналов с учетом частотно-временных зависимостей, присутствующих в сигналах. Примеры сигналов (условно, «сигнал А» и «сигнал Б») порового давления (давления воды в порах почвы) с дамбы и пропусков представлены на рис. 1 (дамба в городе Бостон, Великобритания). Периодические колебания соответствуют периодам приливов и отливов.

В настоящей статье мы представляем подход к решению задачи восстановления пропусков в измеряемых сигналах. Предлагаемый подход основан на использовании адаптивных алгоритмов восстановления пропусков в сигналах в условиях априорной неопределенности моделей сигналов. Представленные алгоритмы используют исторические данные для восстановления сигналов. Настоящий подход исследовался в [1–3] для системы раннего предупреждения UrbanFlood [7]. Нами также представлен алгоритм на основе модели авторе-

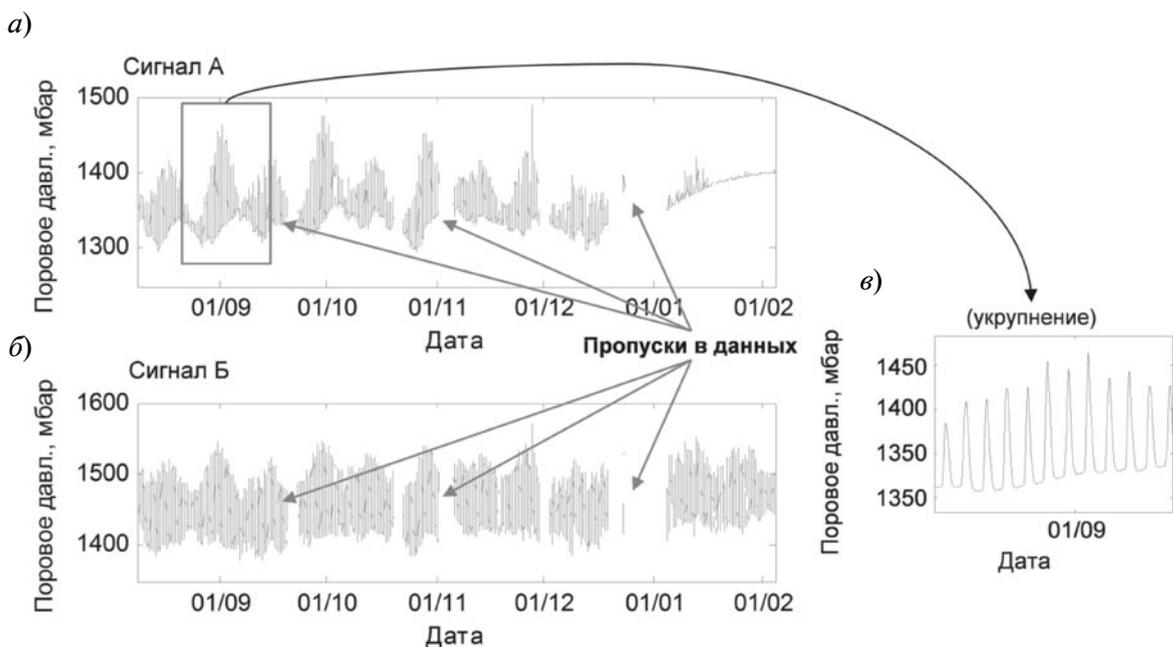


Рис. 1. Примеры сигналов и пропусков в сигналах, формат даты ДД/ММ, 2011-2012 гг.: а – «сигнал А»; б – «сигнал Б»; в – укрупненный участок «сигнала А»

грессии для восстановления пропусков в сигналах. Апробация алгоритмов проводилась на основе данных мониторинга дамбы, расположенной в городе Бостон.

Существует несколько способов восстановления пропусков в сигналах: сплайны, линейная интерполяция, интерполяционные фильтры [8]. Общий недостаток этих методов в том, что они выполняют интерполяцию без восстановления частотно-временных свойств сигналов на участках пропусков. В работе [9] представлен алгоритм восстановления на основе разложения по эмпирическим модам, которое не является стабильным и может привести к неудовлетворительному результату еще на этапе разложения сигнала [10]. При использовании алгоритмов на основе нейронных сетей возникает проблема обучения модели и потери стабильности результатов восстановления [6]. Стоит также отметить алгоритмы 3d-var и 4d-var [11], используемые в метеорологии, для которых требуются априорно заданные модели сигналов и помех. В случае применения алгоритмов многомерного восстановления сигналов накладываются ограничения, связанные с зависимостью процедуры восстановления от доступности других данных (сигналов). Одним из наиболее интересных алгоритмов адаптивного восстановления данных является алгоритм на основе метода «Гусеница-SSA», представленный в статье [12]. Также интересные результаты показаны при использовании алгоритма на основе преобразования Ломба–Скаргла (преобразование Фурье для сигналов с неравномерной дискретизацией)

[13]. Эти алгоритмы могут применяться к одномерным сигналам и имеют высокую точность восстановления.

Алгоритм синхронизации и восстановления пропусков в измеряемых сигналах

Алгоритм синхронизации и восстановления пропусков в измеряемых сигналах состоит из четырех основных этапов (рис. 2).

Этап 1 – проверка измерений (валидация) и обнаружение пропусков. Под ошибками измерений подразумеваются выбросы в измерениях, различные специфические ошибки, например, последовательности нулей, специальные значения измерений, соответствующие сбоям датчиков и т. д. Алгоритм обнаружения пропусков проверяет измерения на наличие пропущенных значений путем сравнения временных дискретов $\Delta_i = t_i - t_{i-1}$ каждого измерения с задаваемой величиной дискретизации ЕВС. Если Δ_i превышает величину дискретизации ЕВС, то отмечается пропуск между измерениями.

Этап 2 – интерполяция сигналов на единую временную сетку (ЕВС). На этом этапе выполняется интерполяция измерений с разной частотой дискретизации на единую временную сетку. Требуемая величина дискретизации ЕВС задается исходя из условий эксплуатации.

Этап 3 – восстановление пропусков. Алгоритмы восстановления пропусков оценивают пропущенные значения измеряемых сигналов в местах пропусков, которые могут варьироваться от одного пропущенного

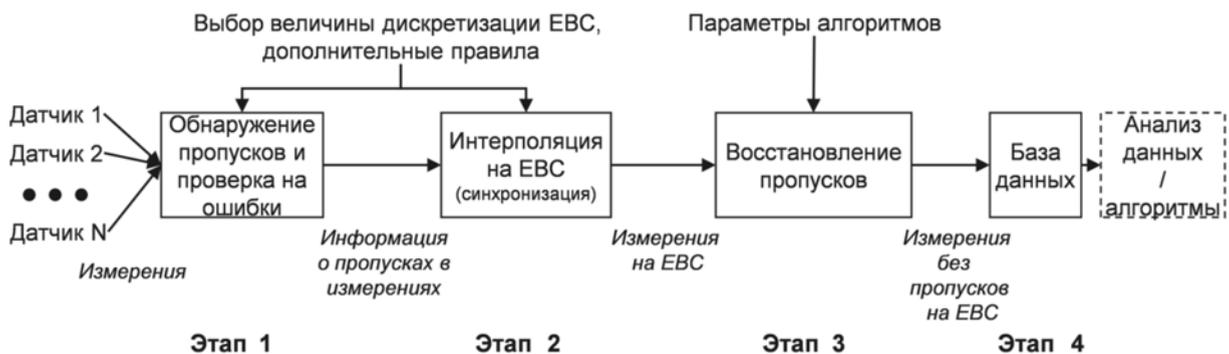


Рис. 2. Алгоритм синхронизации измерений и восстановления пропусков в измеряемых сигналах

измерения до сотен, в зависимости от типа измерений. Этот этап является наиболее сложным, и далее в статье будут исследоваться алгоритмы этого этапа.

Этап 4 – запись результатов в базу данных. Восстановленные и синхронизированные сигналы записываются в базу данных, места восстановленных значений помечаются специальным флагом в базе данных.

Постановка задачи восстановления пропусков измеряемых сигналов

После этапа синхронизации сигналов формируются измерения с постоянной частотой дискретизации, описываемые временными рядами $X = \{X(t), t = T\{0 \dots N\}\}$, где T – множество отсчетов времени, $X \in R$.

Значения в некоторых отсчетах времени t отсутствуют (пропуски). Необходимо найти оценку $\hat{X}(t)$ значений сигнала $X(t)$ в местах пропусков. Априорно модель сигнала неизвестна. Имеются исторические записи сигналов (временных рядов).

Алгоритм восстановления пропусков на основе метода «Гусеница-SSA»

«Гусеница-SSA» [14] – это адаптивный непараметрический метод разложения временных рядов (SSA – singular spectrum analysis, сингулярный спектральный анализ). Алгоритм восстановления на основе метода «Гусеница-SSA» рассмотрен в работах [12, 15]. Идея алгоритма восстановления пропусков схожа с алгоритмом прогнозирования на основе метода «Гусеница-SSA» и заключается в оценке сигнала в местах пропусков моделями извлеченных компонент разложения.

Базовый алгоритм «Гусеницы-SSA» раскладывает сигнал на набор компонент $X = \sum_{k=1}^K X^{(k)}$ по базису собственных векторов лаговой ковариационной матрицы сигнала C_X . Для расчета матрицы C_X задается длина окна преобразования L . Матрица C_X может быть рассчитана через траекторную матрицу D временного ряда размерности $K \times L$ (где $K = N - L + 1$), столбцы которой сформированы из исходного временного ряда следующим образом:

$$(X(i), \dots, X(i + L - 2))^T, \quad 1 \leq i \leq K \quad (1)$$

$$C_X = \frac{1}{K} D^T D. \quad (2)$$

Далее рассчитываются собственные векторы E_k ковариационной матрицы C_X . Обозначим $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ собственные числа матрицы C_X . Сумма всех собственных чисел матрицы дает полную дисперсию временного ряда X .

Проецирование временного ряда на каждый собственный вектор дает главные компоненты A_k :

$$A_k(t) = \sum_{j=1}^L X(t + j - 1) E_k(j). \quad (3)$$

Частотные свойства характеризуются парами почти равных собственных чисел и собственных векторов, соответствующих одной частоте. Длина окна L определяет наименьшую частоту, которую будет учитывать разложение SSA.

На последнем этапе алгоритма «Гусеница-SSA» проводится восстановление временного ряда из компонент разложения R_k , которые рассчитываются как линейная комбинация главных компонент и собственных векторов с последующим диагональным усреднением:

$$R_k(t) = \frac{1}{M_t} \sum_{k \in \kappa} \sum_{j=L_t}^{U_t} A_k(t - j + 1) E_k(j), \quad (4)$$

где κ – набор собственных векторов, на основе которых идет восстановление; M_t – фактор нормализации; L_t и U_t – верхние и нижние границы суммирования. M_t , L_t и U_t изменяются в зависимости от положения отсчета времени t относительно начального и конечного отсчетов времени временного ряда $X(t)$ [12].

Алгоритм восстановления пропусков на основе метода «Гусеница-SSA» учитывает временные зависимости во временных рядах для заполнения пропусков. Алгоритм итеративно рассчитывает и переоценивает корреляционную матрицу сигнала C_X и собственные векторы E_k .

Восстановление пропусков происходит следующим образом: сначала сигнал центрируется путем оценки его среднего и заполнения пропусков нулевыми значениями.

После начинается итеративная процедура восстановления. Во внутреннем цикле выполняется разложение сигнала методом «Гусеница-SSA» (вычисляются C_X и E_k). Далее, временной ряд восстанавливается с учетом только первой компоненты R_1 : в местах пропусков записываются новые значения временного ряда $X(t) = R_1(t)$. Эта процедура выполняется до тех пор, пока не будет достигнута сходимость в местах пропусков. Иными словами, результат предыдущего восстановления (внутренний цикл) не будет отличаться от текущего результата.

В качестве критерия сходимости, к примеру, можно выбрать дисперсию разности результатов между текущим и предыдущим итерациями цикла, отнесенную к дисперсии результата восстановления на текущей итерации. После того как во внутреннем цикле будет достигнута сходимость, во внешнем цикле добавится еще одна компонента — R_2 и внутренний цикл восстановления повторится уже для компонент R_1 и R_2 , и так далее по всем компонентам.

Восстановление сигнала происходит за счет итеративной переоценки ковариационной матрицы C_X и адаптивности базиса собственных векторов, как следствие последовательной оценки сигнала в местах пропусков. Подставив выражение (3) в (4), получим:

$$R_k(t) = \frac{1}{M_i} \sum_{k \in K} \sum_{j=L_i}^{L} X(t) E_k(j) E_k(j). \quad (5)$$

Видно, что $R_k(t)$ представляет собой свертку временного ряда с фильтром f_n и является промежуточной оценкой $X^*(t)$ значений $X(t)$:

$$X^*(t) = R_k(t) = \sum_{n=-(L-1)}^{L-1} X(i+n) f_n. \quad (6)$$

С каждой итерацией алгоритм приближает промежуточные оценки $X^*(t)$ к конечной оценке $\hat{X}(t)$. Ширина окна преобразования «Гусеница-SSA» выбирается в два раза большей, чем величина пропуска, чтобы с запасом оценить диапазон частот в пропуске. Также стоит отметить, что преобразование «Гусеница-SSA» для заполнения пропуска использует информацию слева и справа от пропуска, за счет операции диа-

гонального усреднения (4).

Алгоритм восстановления пропусков на основе преобразования Фурье

Алгоритм восстановления предложен в статье [13] для заполнения пропусков в измерениях параметров атмосферы. Алгоритм применим для сигналов, имеющих ярко выраженные периодические составляющие. Идея алгоритма заключается в том, чтобы с использованием спектра Фурье оценивать в сигнале базовые частоты и восстанавливать с их помощью пропущенные значения. В оригинальной статье авторами применялся алгоритм Ломба-Скаргла, т. к. предполагалась неравномерная дискретизация сигнала. В нашем случае мы будем использовать дискретное преобразование Фурье, поскольку сигнал уже синхронизирован и имеет постоянную частоту дискретизации.

Алгоритм состоит из следующих шагов: сначала происходит центрирование временного ряда путем оценки и вычитания среднего и заполнение пропусков нулевыми значениями. К временному ряду применяется прямое дискретное преобразование Фурье:

$$S(k) = \sum_{t=0}^{N-1} X(t) e^{-\frac{2\pi i}{N} kt}, \quad (7)$$

где $S(k)$ — коэффициенты преобразования Фурье; k — индекс частоты.

Далее производится модификация спектра Фурье с целью фильтрации базовых частот сигнала. Выполняется эта процедура путем сравнения амплитуд частот с порогом и приравнивания к нулю частот, которые ниже порога:

$$\hat{S}(k) = \begin{cases} 0, & |S(k)| < Thr \\ S(k), & |S(k)| \geq Thr \end{cases} \quad (8)$$

где Thr — величина порога.

Порог оценивается как средняя мощность спектра плюс три среднеквадратических отклонения разброса мощности спектра. На третьем шаге выполняется обратное преобразование Фурье и заполнение временного ряда в местах пропусков результатами обратного преобразования Фурье и прибавление среднего:

$$\widehat{X}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) e^{\frac{2\pi i}{N} kt}. \quad (9)$$

Стоит отметить, что для восстановления пропуска используется информация обо всем сигнале, за счет того, что коэффициенты Фурье рассчитываются как свертка базиса по всей длине сигнала.

Алгоритм восстановления пропусков на основе модели авторегрессии

Настоящий алгоритм предложен авторами в качестве альтернативы двум предыдущим алгоритмам. Авторегрессионным называется процесс, в котором значение временного ряда находится в линейной зависимости от предыдущих значений временного ряда. Если значение временного ряда зависит от значений, отстоящих от 1 до p лагов (отсчетов времени) назад, то мы наблюдаем авторегрессионный процесс порядка p . Отсюда следует, что авторегрессионная модель (АР) представляет собой модель, в которой моделируемые значения задаются линейной функцией предыдущих наблюдений. По существу, авторегрессионная модель есть аналог линейной многофакторной модели (множественной регрессии) с той лишь разницей, что в качестве независимых переменных выступают предыдущие значения временного ряда. Авторегрессионный временной ряд можно описать следующим образом [16]:

$$X(t) = a_1 X(t-1) + a_2 X(t-2) + \dots + a_p X(t-p) + e(t), \quad (10)$$

где a – коэффициенты авторегрессии; e – белый шум; p – порядок модели авторегрессии.

Для оценки коэффициентов авторегрессии используется метод наименьших квадратов (МНК) [16].

Модель авторегрессии сигнала позволяет вычислять оптимальный прогноз на заданное число шагов вперед и давать оценку ошибки прогноза. Согласно [16] дисперсия $V(l)$ ошибки прогноза на l шагов вперед для модели авторегрессии порядка p [16] оценивается следующим образом:

$$V(l) = (1 + \psi_1^2 + \psi_2^2 + \dots + \psi_{l-1}^2) \sigma_e^2, \quad (11)$$

где σ_e^2 – дисперсия шума модели; ψ – веса, рассчитываемые рекуррентно [16]:

$$\psi_j = a_1 \psi_{j-1} + a_2 \psi_{j-2} + \dots + a_p \psi_{j-p}. \quad (12)$$

Идея алгоритма восстановления пропусков на основе модели авторегрессии заключается в прогнозировании значений временного ряда как вперед во времени, так и назад, с последующим оптимальным усреднением результатов. Таким образом, необходимы две модели временного ряда: прямая во времени M_{AR}^f (прогнозирующая), описываемая выражением (10), и обратная M_{AR}^b (интерполяционная):

$$X(t-p) = a_1^b X(t-p+1) + a_2^b X(t-p+2) + \dots + a_p^b X(t-1) + e(t). \quad (13)$$

Модель, прогнозирующая вперед (прямая), будет давать лучшие оценки в начале пропуска, а модель, прогнозирующая назад (обратная), – лучшие оценки в конце пропуска, т. к. точность прогноза падает с увеличением количества шагов прогнозирования, в соответствии с выражением (11).

Зная оценки значений в местах пропусков прямой и обратной модели $\widehat{X}^f(t)$ и $\widehat{X}^b(t)$ соответственно и дисперсии ошибки оценки прогноза прямой и обратной моделей, формула (11), для каждого момента времени V_t^f и V_t^b соответственно, можно применить оптимальное усреднение результатов прогноза методом наилучшей линейной несмещенной оценки, чтобы получить оценку пропущенных значений:

$$\widehat{X}(t) = \frac{V_t^f \widehat{X}^b(t) + V_t^b \widehat{X}^f(t)}{V_t^f + V_t^b}. \quad (14)$$

Алгоритм восстановления состоит из следующих шагов: как в предыдущих алгоритмах сначала исходный временной ряд центрируется путем вычитания среднего и заполнения пропусков нулевыми значениями. Далее оцениваются прямая M_{AR}^f и обратная M_{AR}^b модели. Оценка модели авторегрессии проводится методом перекрестной проверки, заключающимся в искусственном создании пропусков разной величины в сигналах, восстановления пропусков разными моделями и выбора такой модели, которая давала бы наименьшую ошибку на

всех пропусках [17]. На третьем шаге выполняется оценка значений в местах пропусков обеими моделями. На последних шагах выполняется оптимальное усреднение результатов и прибавление среднего.

Сравнение алгоритмов восстановления пропусков

Мы провели апробацию алгоритмов на реальных данных системы мониторинга состояния дамбы города Бостон (Великобритания). В дамбе была установлена сеть многопараметрических датчиков, измеряющих поровое давление (давление воды в порах почвы), температуру почвы и отклонение от вертикали (инклинометры). Дискретизация сигналов составляла 15 мин. Был проведен анализ датчиков порового давления.

Для моделирования было выбрано 14 сигналов, по 7 сигналов из различных точек установки в дамбе. Примеры трех сигналов для моделирования представлены на рис. 3. Для получения точностных характеристик восстановления пропусков в каждом из сигналов в случайных местах создавались искусственные пропуски величиной от 15 мин (один отсчет) до двух недель (1344 отсчета). Для всех сигналов пропуск каждой величины генерировался тысячу раз в случайные моменты времени. Приведенные в настоящей статье алгоритмы восста-

новления также сравнивались с линейной интерполяцией.

Для расчета характеристик точности восстановления были выбраны метрики: R^2 – коэффициент детерминации (p -квадрат) и СКО (среднеквадратическое отклонение) ошибки оценки.

R^2 рассчитывается следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_{\delta}^2}{\sigma_x^2}, \quad (14)$$

где σ_{δ}^2 – дисперсия ошибки оценки пропущенных значений; σ_x^2 – дисперсия сигнала.

С уменьшением дисперсии ошибки оценки R^2 стремится к единице, с увеличением ошибки оценки R^2 стремится к отрицательным значениям. Значение R^2 мы считали минимально допустимым.

На рис. 4 представлены зависимости R^2 и СКО ошибки оценки соответственно для разных величин пропусков от 15 мин (один отсчет) до двух недель (1344 отсчета). Примерно одинаковую точность показывают алгоритмы восстановления на основе «Гусеница-SSA» и AP-модели, далее следует алгоритм на основе преобразования Фурье и наихудшая точность соответствует линейной интерполяции. Алгоритм на основе «Гусеница-SSA» обеспечивает значение

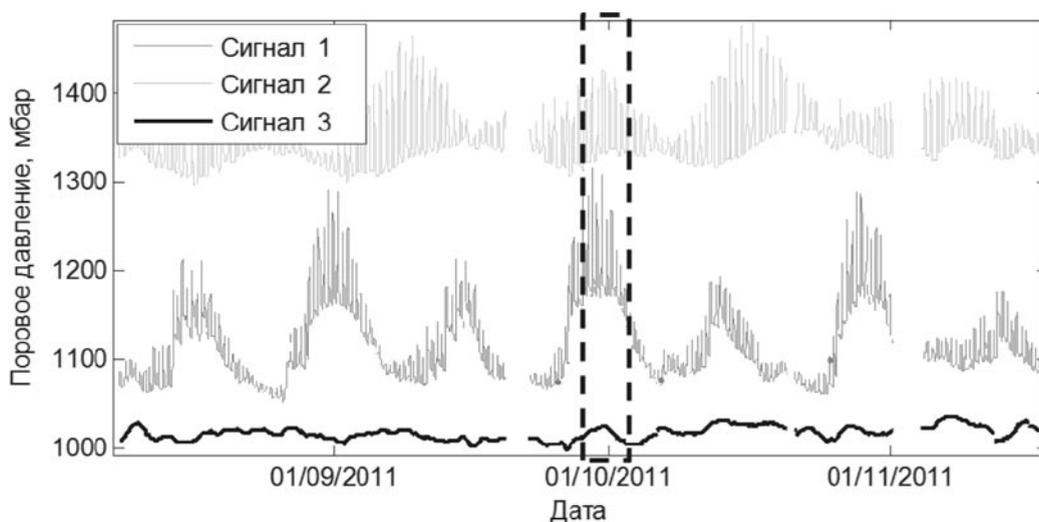


Рис. 3. Сигналы для апробации алгоритмов, формат даты ДД/ММ/ГГГГ, пунктирной рамкой выделен пример места, где создавался искусственный пропуск

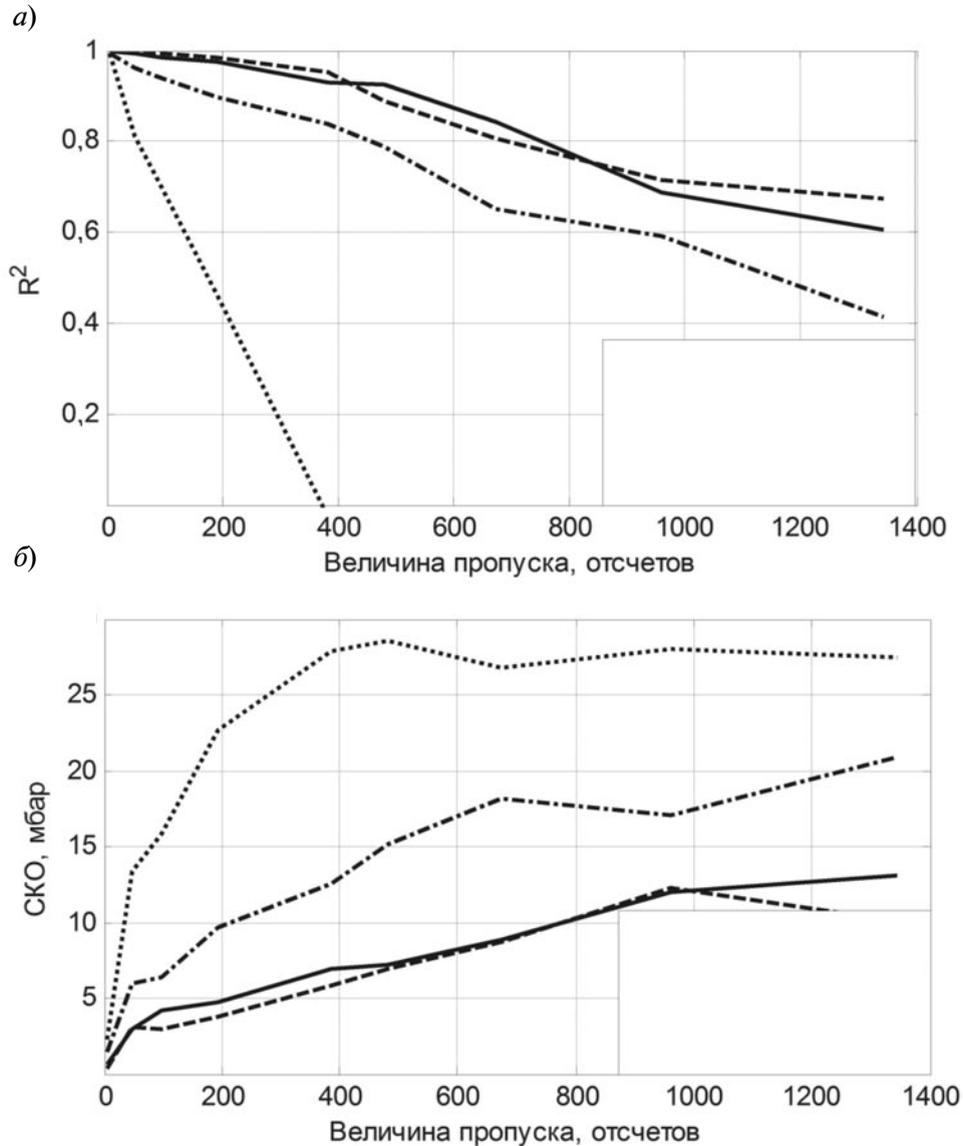


Рис. 4. Анализ точности восстановления:
 а – зависимость коэффициента детерминации от величины пропуска для всех алгоритмов;
 б – зависимость SKO ошибки оценки от величины пропуска для всех алгоритмов
 (.....) лин. интерполяция; (—·—) преобразование Фурье; (----) «Гусеница SSA»; (—) AP

$R^2 = 0,8$ для величины пропуска 755 отсчетов ($\sim 1,12$ недели) с SKO ≈ 10 (мбар). AP-модели обеспечивают значение $R^2 = 0,8$ для величины пропуска 672 (одна неделя) с SKO ≈ 8 (мбар). Для величины пропуска до 10 отсчетов (150 мин) все алгоритмы показывают примерно одинаковую точность восстановления. Это говорит о том, что для восстановления небольших пропусков (до 10 отсчетов) можно использовать линейную интерполяцию на этапе синхрониза-

ции измерений. Значения R^2 ниже нуля не показаны (линейная интерполяция), т. к. соответствуют слишком низкой точности, не интересной для анализа.

На рис. 5 представлены примеры восстановления пропусков величиной 384 отсчета (пять дней) для сигналов 1, 2 и 3. Вырезанный участок сигнала представлен на рис. 3 и отмечен пунктирной рамкой. Как видно, алгоритмы восстановления на основе «Гусеница-SSA», AP-модели и пре-

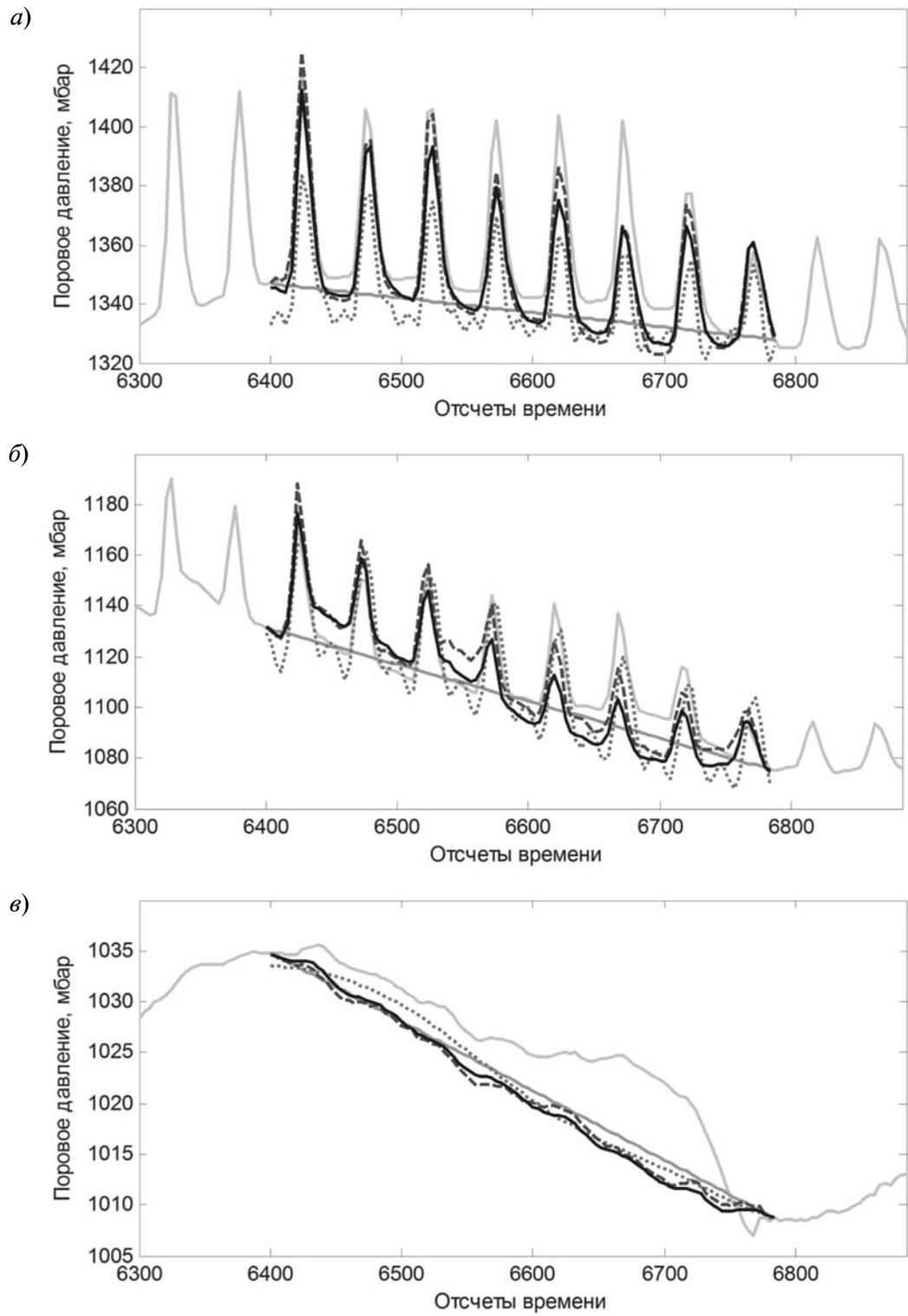


Рис. 5. Примеры восстановления пропусков в сигналах, представленных на рис. 3 пунктирной рамкой:

a – сигнал 1; *b* – сигнал 2; *c* – сигнал 3
 (—) реальный сигнал; (---) лин. интерп.; (.....) преобр. Фурье; (-.-.-) «Гусеница SSA»; (—) AP

образования Фурье сохраняют динамику сигнала и показывают примерно одинаковое поведение.

Стоит отметить, что важным фактором в выборе конкретного алгоритма восстановления пропусков является время восстановления пропуска, которое зависит от вычислительной сложности алгоритма. В случае алгоритма на основе «Гусеница-SSA», наиболее сложный этап расчета – сингулярное разложение ковариационной матрицы, вычислительная сложность которого $O(K \cdot L^2)$, где L – величина окна преобразования, $K = N - L + 1$, также необходимо учесть, что для восстановления пропуска вычисления проводятся итерационно и, как следствие, сингулярное разложение вычисляется много раз, что сильно увеличивает общее время восстановления. Вычислительная сложность МНК для авторегрессии $O(p^3)$, где p – порядок модели авторегрессии. Вычислительная сложность для быстрого преобразования Фурье $O(N \cdot \log(N))$, где N – длина временного ряда. Таким образом, наиболее эффективным с точки зрения скорости вычисления является алгоритм на основе преобразования Фурье, затем – алгоритм на основе модели авторегрессии и, наконец, самые высокие вычислительные затраты соответствуют алгоритму на основе метода «Гусеница-SSA».

Предложенный подход к восстановлению пропусков в измеряемых сигналах основан на использовании адаптивных алгоритмов восстановления пропусков в сигналах в условиях априорной неопределенности параметров сигналов. Суть представленных алгоритмов заключается в оценке пропущенных значений с использованием исторических записей измеряемых сигналов. Преимущества такого подхода состоят в том, что алгоритмы адаптируются с учетом поведения сигналов и не требуют

предварительной оценки параметров сигналов.

В данной статье сравнивались четыре алгоритма восстановления пропусков: на основе метода «Гусеница-SSA», преобразования Фурье, линейной интерполяции, а также предложенный нами алгоритм на основе модели авторегрессии.

Сравнение алгоритмов восстановления пропусков было проведено на реальных данных дамбы города Бостон (Великобритания). Для пропусков величиной до 10 отсчетов все алгоритмы показали высокую точность, что говорит о том, что для восстановления небольших пропусков достаточно использовать линейную интерполяцию. Алгоритм на основе преобразования Фурье показал худшие результаты, чем алгоритмы на основе метода «Гусеница-SSA» и модели авторегрессии. Но его преимущество состоит в том, что для его вычисления можно использовать быстрое преобразование Фурье, а это может пригодиться в приложениях, где существуют ограничения на быстроедействие. Алгоритмы на основе метода «Гусеница-SSA» и модели авторегрессии показали высокую точность восстановления пропусков величиной менее семи дней, учитывая частотно-временные свойства измеряемых сигналов. К недостаткам алгоритмов можно отнести сравнительно высокие вычислительные затраты, особенно для алгоритма на основе «Гусеницы-SSA».

Предлагаемый подход к восстановлению пропусков в сигналах, опирающийся на рассмотренные алгоритмы, может быть распространен и на другие системы, такие как системы водоснабжения, метеорологические системы и другие, в которых актуальны проблемы, связанные с улучшением качества измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта Евросоюза FP7, проект UrbanFlood, грант № 248767.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krzhizhanovskaya V.V. et al. Flood early warning system: design, implementation and computational modules // *Procedia Computer Science*. 2011. No. 4. Pp. 106–115.
2. Козионов А.П. и др. Вейвлет-преобразо-

вание и одноклассовая классификация для мониторинга состояния дамб // Информационно-управляющие системы. 2014. Вып. 71. № 4.

3. Pyayt A. et al. Data-driven modelling for flood defence structure analysis // *Comprehensive*

Flood Risk Management. Rotterdam: Klijn & Schweckendiek, 2013.

4. **Pyayt A.L. et al.** Time-Frequency Methods for Structural Health Monitoring // *Sensors*. 2014. No. 14. Pp. 5147–5173.

5. **Quevedoa J. et al.** Validation and reconstruction of flow meter data in the Barcelona water distribution network // *Control Engineering Practice*. 2012. Vol. 6. No. 18. Pp. 640–651.

6. **Moffata A.M. et al.** Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006. Vol. 3. No. 147.

7. UrbanFlood project [Электронный ресурс] / URL: <http://www.urbanflood.eu>

8. **Spath H.** *One-Dimensional Spline Interpolation Algorithms*. MA: AK Peters Wellesley, 1995.

9. **Moghtaderi A., Borgnat P., Flandrin P.** Gap-filling by the empirical mode decomposition // *IEEE Internat. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 2012. Pp. 3821–3824.

10. **Wei Q. et al.** Analysis of EEG via Multivariate Empirical Mode Decomposition for Depth of

Anesthesia Based on Sample Entropy // *Entropy*. 2013. No. 15. Pp. 3458–3470.

11. **Lorenc C., Rawlins F.** Why does 4D-Var beat 3D-Var? // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2005. Vol. 613. No. 131.

12. **Kondrashov D., Shprits Y., Ghil M.** Gap filling of solar wind data by singular spectrum analysis // *Geophysical research letters*. 2010. Pp. 1–6.

13. **Hocke K., Kämpfer N.** Gap filling and noise reduction of unevenly sampled data by means of the Lomb-Scargle periodogram // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. No. 9. Pp. 4197–4206.

14. **Голяндина Н.Э.** Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 87 с.

15. **Golyandina N., Osipov E.** The “Caterpillar”-SSA method for analysis of time series with missing values // *J. of Statistical Planning and Inference*. 2007. Vol. 8. No. 137. Pp. 2642–2653.

16. **Box G., Jenkins G.** *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1970.

REFERENCES

1. **Krzhizhanovskaya V.V. et al.** Flood early warning system: design, implementation and computational modules, *Procedia Computer Science*, 2011, No. 4, Pp. 106–115.

2. **Kozionov A.P. et al.** Veyvlet-preobrazovaniye i odnoklassovaya klassifikatsiya dlya monitoringa sostoyaniya damb [The wavelet transform and odnoklassovaya classification for monitoring dams]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and Control Systems]*, 2014, Vol. 71, No. 4. (rus)

3. **Pyayt A. et al.** Data-driven modelling for flood defence structure analysis, *Comprehensive Flood Risk Management*. Rotterdam: Klijn & Schweckendiek, 2013.

4. **Pyayt A.L. et al.** Time-Frequency Methods for Structural Health Monitoring, *Sensors*, 2014, No. 14, Pp. 5147–5173.

5. **Quevedoa J. et al.** Validation and reconstruction of flow meter data in the Barcelona water distribution network, *Control Engineering Practice*, 2012, Vol. 6, No. 18, Pp. 640–651.

6. **Moffata A.M. et al.** Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, Vol. 3, No. 147.

7. *UrbanFlood project*. Available: <http://www.urbanflood.eu>

8. **Spath H.** *One-Dimensional Spline Interpolation Algorithms*. MA: AK Peters Wellesley, 1995.

9. **Moghtaderi A., Borgnat P., Flandrin P.** Gap-filling by the empirical mode decomposition, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2012, Pp. 3821–3824.

10. **Wei Q. et al.** Analysis of EEG via Multivariate Empirical Mode Decomposition for Depth of Anesthesia Based on Sample Entropy, *Entropy*, 2013, No. 15, Pp. 3458–3470.

11. **Lorenc C., Rawlins F.** Why does 4D-Var beat 3D-Var? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, Vol. 613, No. 131.

12. **Kondrashov D., Shprits Y., Ghil M.** Gap filling of solar wind data by singular spectrum analysis, *Geophysical research letters*, 2010, Pp. 1–6.

13. **Hocke K., Kämpfer N.** Gap filling and noise reduction of unevenly sampled data by means of the Lomb-Scargle periodogram, *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, No. 9, Pp. 4197–4206.

14. **Golyandina N.E.** *Metod «Gusenitsa»-SSA: analiz vremennykh ryadov [The Caterpillar-SSA method for analysis of time series]*. St. Petersburg: SPbGU Publ., 2003, 87 p. (rus)

15. **Golyandina N., Osipov E.** The “Caterpillar”-SSA method for analysis of time series with missing values, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2007, Vol. 8, No. 137, Pp. 2642–2653.

16. **Box G., Jenkins G.** *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1970.

КОЗИОНОВ Алексей Петрович – аспирант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, инженер ООО «Сименс».

191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.

E-mail: alexey.kozionov@gmail.com

KOZIONOV Alexey P. *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Siemens, Corporate Technology.*

191186, Volynskii Lane 3A, St. Petersburg, Russia.

E-mail: alexey.kozionov@gmail.com

ПЯЙТ Александр Леонидович – ведущий инженер ООО «Сименс».

191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.

E-mail: alexander.pyayt@siemens.com

PYAYT Alexander L. *Siemens.*

191186, Volynskii Lane 3A, St. Petersburg, Russia.

E-mail: alexander.pyayt@siemens.com

МОХОВ Илья Игоревич – ведущий эксперт-исследователь ООО «Сименс».

191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.

E-mail: ilya.mokhov@siemens.com

МОКHOV Илья I. *Siemens.*

191186, Volynskii Lane 3A, St. Petersburg, Russia.

E-mail: ilya.mokhov@siemens.com

ИВАНОВ Юрий Павлович – доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук.

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 61.

E-mail: upi@mail.ru

IVANOV Yuri P. *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.*

190000, Bolshaya Morskaya Str. 61, St. Petersburg, Russia.

E-mail: upi@mail.ru



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.9

УДК 004.923

А.А. Хуршудов

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АНСАМБЛЯ ТРАНСФОРМИРУЮЩИХ АВТОАССОЦИАТОРОВ

А.А. Khurshudov

USING AN ENSEMBLE OF TRANSFORMING AUTOENCODERS TO REPRESENT 3D OBJECTS

Одна из ключевых задач машинного обучения в области компьютерного зрения — получение качественных представлений визуальных данных, остающихся устойчивыми к изменениям угла обзора, позиции в сцене, эффектов освещения или текстуры изображенного объекта. Существующие современные модели сверточных сетей, такие как **GoogLeNet** или **AlexNet** успешно решают эту задачу в некоторых условиях, формируя инвариантные представления, достаточные для эффективной классификации множества объектов. Некоторые исследователи (Хинтон, Крижевский и др.), однако предполагают, что используемый этими моделями подход, несмотря на впечатляющие результаты в задачах классификации, является фундаментально ошибочным по отношению к тому, что должна представлять собой эффективная зрительная система: инвариантные представления не способны реагировать на изменения положения объекта в пространстве. Упомянутые авторы предполагают, что целью любой качественной модели зрительной системы должна быть не инвариантность, а эквивариантность — способность изменять представление объекта предсказуемым образом в ответ на наблюдаемые пространственные преобразования.

В данной статье использована предложенная Хинтоном архитектура подобной эквивариантной модели трансформирующего автоассоциатора, модифицированная таким образом, чтобы обнаруживать низкоуровневые композиционные признаки в изображениях трехмерных объектов. С применением SVM-классификатора и использованием свойств трансформирующего автоассоциатора продемонстрирована возможность представления сложных трехмерных форм в виде ансамбля ограниченного количества автоассоциаторов, каждый из которых соответствует локальному признаку объекта. Благодаря способности трансформирующего автоассоциатора определять не только присутствие выученного признака, но и его пространственные параметры, становится также возможным соотносить вместе изображения одних и тех же объектов в условиях, существенно различных на уровне пикселей.

ТРАНСФОРМИРУЮЩИЙ АВТОАССОЦИАТОР; ОДНОРАЗОВОЕ ОБУЧЕНИЕ; ЭКВИВАРИАНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ; КАПСУЛЫ.

One of the key goals of computer vision-related machine learning is to obtain high-quality representations of visual data resistant to changes in viewpoint, area, lighting, object pose or texture. Current state-of-the-art convolutional networks, such as **GoogLeNet** or **AlexNet**, can successfully produce invariant representations sufficient to perform complex multiclass classification. Some researchers, however, (Hinton, Khizhevsky, et al.) suggest that this approach, while being quite suitable for classification tasks, is misguided in terms of what an efficient visual system should be capable of doing: namely, being able to reflect spatial transformations of learned objects in a predictable way. The key concept of their research is equivariance rather than invariance, or the model's ability to change representation parameters in response to different poses and transformations of a model-specific visual entity.

This paper employs Hinton's architecture of transforming autoencoder neural networks to identify low-level spatial feature descriptors. Applying a supervised SVM classifier to these detectors, one can then represent a sufficiently complex object, such as a geometric shape or a human face, as a composition of spatially related features. Using the equivariance property, one can also draw distinctions between different object poses, e.g., a frontal face image or a profile image, and then, be able to learn about another, higher-leveled transforming autoencoder via the same architecture. To obtain initial data for first-level feature learning, we use sequences

of frames, or movies, and apply computer vision algorithms to detect regions of maximum interest and track their image patches across the movie. We argue that this way of learning features represents a more realistic approach to vision than general naive feature learning from a supervised dataset. The initial idea came from the concept of one-shot learning (by Fei-Fei et al.), that suggests a possibility of obtaining meaningful features from just one image (or, as in this study, a rather limited set of images supervised by time and order).

TRANSFORMING AUTOENCODER; ONE-SHOT LEARNING; EQUIVARIANT REPRESENTATION; CAPSULES.

Задача распознавания объектов окружающего мира по их визуальным изображениям представляет собой частный случай задачи классификации объектов по категориям (как заданным экспериментатором, так и определяемым алгоритмом). Эффективность решения соответствующих задач и классификации проблемной выборки считаются значительным критерием успешности моделей зрительных систем в целом. Типичная задача классификации представляется следующими условиями:

1. Выборка состоит из набора фотографий, равномерно распределенного по классам.

2. Каждая фотография промаркирована соответствующим классом, и модели могут использовать эти данные в качестве учителя.

3. Выборка делится случайным образом на две подгруппы: обучающую выборку и тестовую выборку (опционально возможно выделение отдельной подгруппы для проведения перекрестной проверки).

4. Обучающая выборка используется в качестве входных данных модели, параметры которой в ходе обучения подстраиваются таким образом, чтобы выходные данные модели соответствовали представленным учителем классам. Для этой цели, как правило, используется алгоритм обратного распространения ошибки.

Конкретным примером такой задачи является соревнование ImageNet [1], в котором используется выборка естественных изображений размера порядка миллиона снимков, сгруппированных по тысяче классов.

В случаях, когда выборка представляет собой достаточно репрезентативное множество фотографий, включающее в себя изображения, различающиеся по форме,

освещению и положению в кадре, модель обучается так называемым инвариантным признакам, характеризующим принадлежность изображения к классу вне зависимости от перечисленных факторов. Обучение инвариантным признакам является желаемым результатом, позволяющим успешно распознавать изображения вне зависимости от преобразований, изменяющих внешний вид объекта, но не искажающих его классовой принадлежности. Некоторые исследователи, однако, замечают [2, 3], что, несмотря на эффективные результаты и высокий процент правильных предсказаний, соответствующие модели не отвечают фундаментальным свойствам зрительной системы.

Во-первых, модель, строящая свои предсказания на признаках, полученных из мультиклассовой выборки, становится уязвимой к аномальным ситуациям, выходящим за рамки выборки. Например, изображение на рис. 1 классифицируется моделью CaffeNet [15] как ягуар/леопард. Одновременно с этим модель способна усваивать тонкие различия, несущественные для наблюдателя-человека. Так, модели, показывающие высокие результаты на выборке ImageNet (такие как GoogLeNet, CaffeNet и AlexNet [14, 15]), способны провести различие между фотографиями гепарда и ягуара (отличительными признаками является структура пятен в расцветке шерсти), которых легко может спутать между собой человек без специальных познаний.

При этом такое поведение модели полностью соответствует цели обучения на выборке: в рамках заданных классов характерная пятнистая текстура оказывается достаточным признаком для определения класса. С точки зрения обученной модели пример на рис. 1 оказывается аномалией,



Рис. 1. Предсказания модели CaffeNet, обученной на выборке ILSVRC12.
В скобках указаны числовые значения классов

отклонением, включение которого в выборку позволило бы скорректировать ошибку. Однако подобный подход требует значительных затрат на ручное составление выборки и в основе своей отличается от того, как обучается головной мозг животных, не имеющих в естественной среде доступа к выборкам таких размеров.

Во-вторых, как отмечают Хинтон, Крижевский и Ванг [2], преимущество инвариантности моделей сверточных сетей оказывается фундаментальным недостатком, когда задача распознавания перестает ограничиваться классификацией фотографий по классам. Для большинства приложений зрительной системы, таких как ориентация в пространстве, анализ сцен, принятие решений в соответствии с увиденным, требуется уметь определить не только класс объекта в поле зрения, но и особенности его пространственного расположения, позу и прочие параметры. Использование последовательных слоев свертки и пулинга в сверточных сетях позволяет добиться высокой устойчивости к пространственным вариациям, но одновременно отбрасывает эту необходимую информацию без возможности восстановления. В своей работе авторы представляют архитектуру нейронной сети – трансформирующего автоассоциатора, способного помимо присутствия объекта на изображении в ходе обучения фиксировать эти пространственные параметры и предсказывать не только вероятность наличия объекта на изображении, но и его ориентацию.

Таким образом, можно определить не-

сколько подзадач в решении задачи зрительного распознавания:

1. Признаки, используемые моделью для определения объектов, должны быть достаточными не только для классификации объектов в условиях ограниченной выборки.

2. Основываясь на данных об обучении естественных зрительных систем, можно сделать вывод о существовании признаков, которым модель может обучаться на нескольких (<10) примерах, и эффективно использовать их для распознавания. Для ускорения обучения и фиксации на наиболее характерных элементах изображения, модель должна уметь отыскивать и использовать такие признаки.

3. Требуется сформулировать алгоритм обучения таким локальным характерным признакам. Почти не подлежит сомнению, однако, то, что свойство эквивариантности должно быть в их описании определяющим. Многообещающим кандидатом выглядят локальные эквивариантные капсулы [2] – компактные нейронные сети архитектуры трансформирующего автоассоциатора, способные играть роль как детектора присутствия признака, так и регрессора, оценивающего его пространственные параметры.

Далее мы рассмотрим один из возможных способов обучения таким признакам и эффективность его использования при распознавании.

Трансформирующий автоассоциатор

Полное описание архитектуры в ее оригинальном варианте представлено в не-

скольких работах [2, 4, 5]. В данном разделе предлагается рассмотреть упрощенный обзор архитектуры и модификации.

Трансформирующий автоассоциатор как представитель класса автоассоциаторов представляет собой нейронную сеть, обучающуюся компактному представлению («коду») данных с помощью обратного распространения ошибки, используя при этом в качестве эталонного значения на выходе сети тот же набор данных, что и на входе. В общем случае автоассоциаторы используются для снижения размерности наряду с другими техниками, наподобие анализа главных компонент. При этом чем больше слоев у автоассоциатора, тем более сложное и нелинейное представление он способен выучить.

Основная проблема обучения автоассоциаторов состоит в том, что цель обучения – наиболее точным образом воссоздать входные данные, пропущенные через «бутылочное горлышко» скрытого слоя – не всегда позволяет получить осмысленный обобщенный код, подходящий для использования за пределами выборки. В противном случае автоассоциатор играет роль компрессора, бесполезного для распознавания. Существует несколько техник для решения этой проблемы, одна из которых заключа-

ется в том, чтобы обучать сеть с помощью пар трансформированных изображений и дополнительно добавлять численное значение трансформации (dx и dy для случаев трансляции, эйлеровы углы для трехмерного вращения или матрицу аффинного преобразования) к среднему слою автоассоциатора. Схема сети показана на рис. 2.

Здесь V и O – входной и выходной слою; R и G – слои снижения размерности, их составляющие элементы обучаются, соответственно, признакам для представления объекта (recognition units) и признакам для генерирования трансформации (generation units); I – «бутылочное горлышко» автоассоциатора, представленное одним нейроном P , кодирующим вероятность присутствия объекта на изображении, и нейронами I_α, I_β и I_γ , кодирующими эйлеровы углы поворота. Матрицы W_{VR}, W_{RI}, W_{IG} и W_{GO} представляют собой веса нейронов между соответствующими парами слоев.

Трансформирующий автоассоциатор обучается с подачей на вход и выход пары трансформированных изображений и добавлением к нейронам слоя I известных значений трансформации (в данном случае – изменения угла обзора).

Для обучения элемента P , однако, сети необходимо выработать дискриминирую-

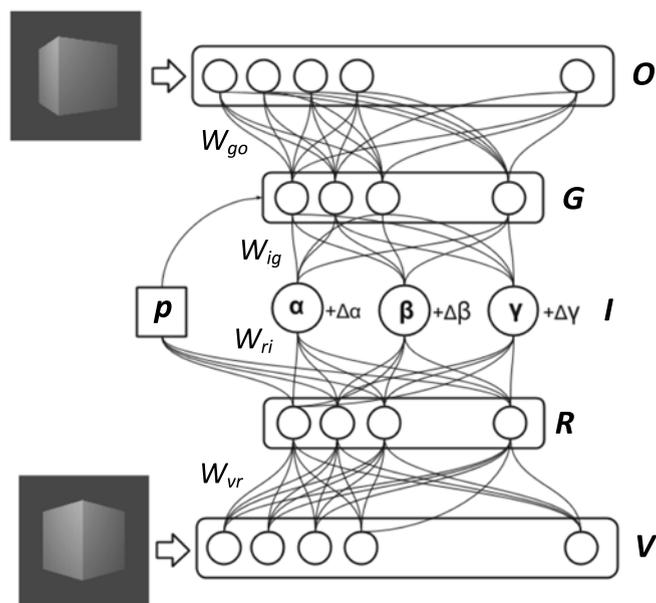


Рис. 2. Схема трансформирующего автоассоциатора

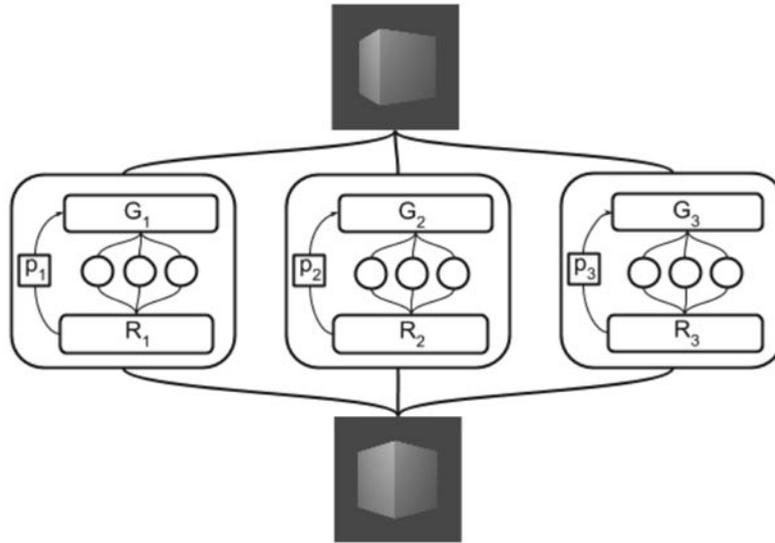


Рис. 3. Схема модели, состоящей из нескольких капсул

щие правила, позволяющие ей различать объекты разных категорий. Для этого в оригинальной работе предлагается тренировать трансформирующие автоассоциаторы совместно, формируя совокупную гипотезу в виде линейной суммы компонентов модели. Отдельные автоассоциаторы такой модели носят название «капсул» и активируются при присутствии на изображении своего класса объектов. В дальнейшем мы будем использовать термины «капсула» и «трансформирующий автоассоциатор» в качестве синонимов. Схема капсульной модели приведена на рис. 3.

В ходе обучения модели вычисляются градиенты следующих функций (активаций сети; приведены в порядке от входного слоя к выходному):

$$a_R = \sigma(xW_{VR}^c + b_{VR}^c); \quad (1)$$

$$a_I = \sigma(a_R W_{RI}^c + b_{RI}^c); \quad (2)$$

$$a_{I'} = a_I + T; \quad (3)$$

$$h = \sigma(a_{I'} W_{GO}^c + b_{GO}^c), \quad (4)$$

где $\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$; c – индекс c -й капсулы; T – вектор трансформации (α, β, γ) .

В качестве функции цены используются среднеквадратичное отклонение, функция кросс-энтропии или любые стандартные

варианты, применяющиеся в нейронных сетях с обратным распространением.

Трансформирующий автоассоциатор как детектор признаков

Капсульная модель, представленная выше, предназначена для мультиклассовой классификации и обучается на выборке с фиксированным количеством категорий объектов. При этом в некоторых случаях капсулам не удается обучиться дискриминированным представлениям [5]: вместо этого они кооперируются между собой так, что каждая из них по отдельности обучается зашумленному, неявному и частично представленному данным. Имея в качестве конечной цели решение проблем, перечисленных в начале статьи, предлагаем следующую модификацию для использования автоассоциатора:

1. Отдельная капсула обучается не на сложных, составных объектах, таких как лица, предметы или пейзажи, а на их низкоуровневых элементах: деталях лиц, углах, характерных неоднородностях.

2. Каждая капсула обучается на множестве трансформаций определенного низкоуровневого участка изображения с целью выработать характерные для определения трехмерной ориентации признаки. Конкретная капсула ничего не знает о других капсулах и других низкоуровневых объ-

ектах и выполняет задачу регрессора: для определенного участка изображения она способна определить его ориентацию в пространстве.

3. Затем, с использованием полученных капсулами признаков, обучим дискриминирующие детекторы, способные отличать регионы капсул друг от друга и от фоновых участков изображения. Каждый детектор, таким образом, выполняет в отношении своей капсулы одноклассовую классификацию (решая задачу «один против всех»).

4. Имея в распоряжении набор локальных регрессоров (капсул) и соответствующих детекторов, мы можем представить изображенный объект в виде ансамбля трансформирующих автоассоциаторов, связанных пространственными отношениями. Поскольку трансформирующие автоассоциаторы способны реагировать на изменение ориентации объектов, становится возможным представить одним и тем же ансамблем изображения, существенно отличающиеся на уровне пикселей (например, лицо в профиль и в фас), сохраняя при этом эквивариантность полученного представления.

Модифицируем архитектуру автоассоциатора следующим образом: в модели будет принимать участие только одна капсула, и за неимением необходимости удалим элемент сети P , отвечающий за вероятность обнаружения объекта. Таким образом мы избавляем сеть от необходимости самой по себе принимать классификационные решения и должны следить за тем, чтобы

данные, поступающие на вход капсулы, относились строго к изображениям одного низкоуровневого объекта. Эта задача требует отдельного рассмотрения.

Сбор данных для обучения капсул

Во множестве работ в области психофизиологии отмечалась характерная особенность зрительных систем концентрировать внимание на неоднородных, выделяющихся участках поля зрения [6]. В качестве первого этапа извлечения данных определим соответствующие области на исходном изображении при помощи определителя Гессе [7] и найдем все точки (x, y, t) , удовлетворяющие условию:

$$\det HL(x, y, t) = t^2(L_{xx}L_{yy} - L_{xy}^2), \quad (5)$$

где $L(x, y, t)$ – изображение как функция от переменных x и y при фиксированном масштабе t ; H – матрица Гессе для этой функции; (x, y, t) – координаты, соответствующую центру и радиусу интересующих регионов.

Альтернативный способ решения этой задачи предлагает детектор заметности (saliency) Кадира–Брэди [8], используемый в т. ч. в работах по машинному обучению зрительных систем [9] и определяющий неоднородные участки изображения с помощью вычисления информационно-теоретической энтропии. На рис. 4 приведены примеры участков неоднородности, обнаруженных детекторами.

В некоторых работах (Фей-Фей и др.



Рис. 4. Участки, обнаруженные двумя детекторами.

Слева – детектор Кадира–Брэди, справа – определитель Гессе. Оба детектора в числе прочих регионов находят черты лица

[9, 10]), рассматривающих обучение без выборки (one-shot learning), соответствующие участки используются для построения констелляционной модели на нескольких (<10) изображениях с выравненными позами, отыскивая комбинацию неоднородных участков изображения, которая наилучшим образом описывает тестовую группу. Мы воспользуемся другим подходом под обобщенным названием «время как супервизор» [11]. Рассмотрим последовательность кадров, составляющих видеотрек. Для первого кадра производится поиск участков неоднородности указанным выше способом. Для каждого последующего кадра проводим трекинг обнаруженных участков с помощью таких методов компьютерного зрения, как оптический поток Лукаса-Канаде или детектор ORB [14]. Результатом будут последовательности участков изображения, где каждый из элементов представляет собой результат некоторой трехмерной трансформации предыдущего (рис. 5).

Если численное выражение трансформации известно (его можно определить с помощью использующегося метода трекинга – например, оптического потока, либо контролируя движение камеры), то полученные последовательности могут использоваться для обучения трансформирующих автоассоциаторов, каждый из которых обучается реагированию на определенную функциональную деталь изображения.

Стоит обратить внимание также на то, что хотя множество участков неоднородности в первом кадре представляют собой случайные эффекты освещения и текстуры (см. рис. 4), в процессе трекинга такие

участки естественным образом отбраковываются, исчезая при повороте объекта. Результирующие последовательности представляют собой естественные составные части объекта, что можно наблюдать на примере человеческого лица.

Обучение капсул

Каждый автоассоциатор обучается на одной последовательности из полученных на предыдущем этапе путем составления всевозможных пар элементов последовательностей с определением трансформации между парами. Для общего случая трехмерного объекта трансформация задается тремя значениями α, β и γ – углами Эйлера, соответствующими вращениям камеры (в рассматриваемом примере вращение ограничено одной осью). Каждый автоассоциатор минимизирует функцию цены $J(x)$:

$$J(x) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{2} (h(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \right) + \frac{\lambda}{2} \sum_{l=1}^{m_l-1} \sum_{i=1}^{s_l} \sum_{j=1}^{s_{l+1}} (W_{ij}^{(l)})^2, \quad (6)$$

где m – количество изображений на входе; $h(x^{(i)})$ – выходное значение сети для i -го изображения; λ – параметр регуляризации; $W_{ij}^{(l)}$ – вес связи между i -м нейроном слоя l и j -м нейроном слоя $l-1$.

В процессе обучения отмечено, что добавление к $J(x)$ критерия разреженности увеличивает точность реконструкции автоассоциатора, в некоторых случаях до 40 %. Для выражения критерия разреженности используем дивергенцию Кульбака–Лейбнера:

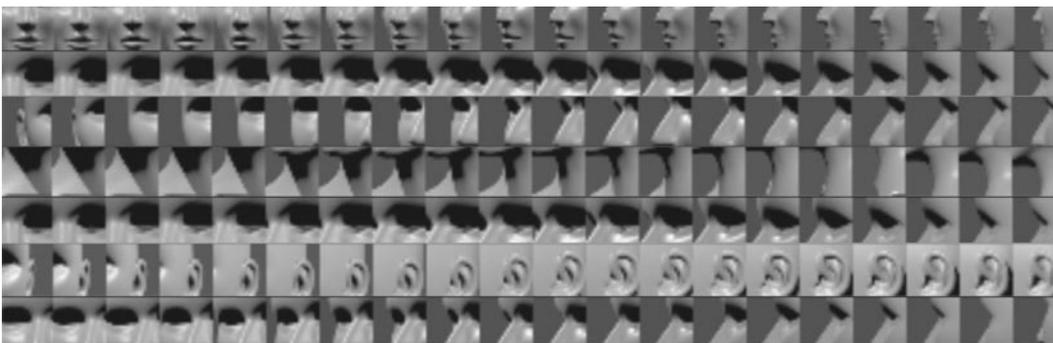


Рис. 5. Последовательности участков неоднородности, обнаруженные при вращении трехмерной модели лица. Вращение ограничено одной осью

$$KL(\rho|\hat{\rho}_j) = \rho \log \frac{\rho}{\hat{\rho}_j} + (1 - \rho) \log \frac{1 - \rho}{1 - \hat{\rho}_j}, \quad (7)$$

где $\hat{\rho}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_j^{(l)} x^{(i)})$ – среднее значение активации j -го нейрона в слое l ; ρ – константа, параметр разреженности.

В обученной капсуле-автоассоциаторе веса нейронов слоя представления (слой R) соответствуют различным состояниям, которые принимает ограниченный полем капсулы участок изображения под воздействием заданных трансформаций.

Признаки, полученные капсулой, сами по себе не являются дискриминативными. Так как назначение капсул двояко – они должны как находить на изображении «свои» участки, так и предсказывать их позу – обучим на обнаруженных признаках детектор, представляющий собой одно-классовый SVM (допустимо использование других алгоритмов, реализующих классификацию «один против всех»).

Построение ансамбля и результаты

Группа обученных капсул оказывается способной находить соответствующие участки даже в тех случаях, когда объект рассматривается с различных углов, а изображения значительно различаются на пиксельном уровне (рис. 6).

Такой ансамбль капсул затем может использоваться для обнаружения композиционного объекта (в рассматриваемом примере – лицо человека). Ключевым достоинством использования капсул является то,

что модель не требует обучения отдельных признаков для лиц в анфас и лиц в профиль, в отличие от общераспространенных методов распознавания лиц [13] (на рис. 6 одним цветом отмечены активации одинаковых капсул). Более того, каждая капсула несет информацию не только о том, активирует ли ее выделенный участок изображения, но и способна предсказать параметры трансформации, которым подвергнута видимая капсулой сущность.

Так, изображение лица в профиль может быть описано с помощью капсул как «глаз, вид слева», «линия губ, вид слева» и «ухо, вид слева». Предсказаний автоассоциатора оказывается более чем достаточно для того, чтобы сделать предсказание касательно ориентации составного объекта лица в целом – более того, наличие дублирующихся предсказаний капсул может оказаться полезным в тех случаях, когда часть признаков не видна (скрыта другими объектами).

Соответствующий ансамбль признаков может в дальнейшем использоваться для обнаружения объектов несколькими способами:

алгоритмически ищется пространство возможных сочетаний признаков, которые могут встретиться на изображении лица (данный подход рассмотрен Фей-Фей в [10], для решения предложено использовать классификатор Байеса и алгоритм максимизации ожиданий);

метод, предлагаемый нами: использовать тот факт, что капсулы на самом деле располагаются не на плоскости, а в трехмерном пространстве. Если нанести их на трехмер-



Рис. 6. Участки изображения, отмеченные капсулами. Особенности трансформирующего автоассоциатора дают возможность распознавать одни и те же сущности с разных углов обзора



ную модель лица (которая может быть получена как в ходе первого этапа обучения с использованием оптического потока [12], так и сторонними способами), то становится возможным представить любую фотографию лица как результат трехмерной трансформации между данным и неким эталонным изображением. Используя активации капсул первого уровня в качестве параметров модели, на этих данных можно обучить еще один, более высокоуровневый трансформирующий автоассоциатор. Преимущество метода состоит в его потенциальной способности к наращиванию: в дальнейшем автоассоциатор, реагирующий на изображение лица, можно совместить с другими автоассоциаторами, обученными на изображениях корпуса/рук/прочих отдельных частей тела, и увеличивать глубину модели, обучая ее эквивариантно реагировать на полноценные человеческие фигуры.

Постепенное развитие эквивариантных моделей, по мнению многих авторов, – будущее если не машинного обучения в целом, то его отрасли, связанной с компьютерным зрением. Несомненно, рассмотренная модель в текущем виде не способна составить конкуренции таким моделям на базе сверточных сетей, как GoogLeNet, AlexNet и CaffeNet, но эта ограниченность проистекает именно из того факта, что классы изображений для этих моделей (леопард/человек/здание и т. д.) представляют собой сложные, многокомпонентные объекты, требующие совместной работы множества капсул. Возможности полноценно обученной эквивариантной модели, однако, обе-

щают значительно больше того, на что способны современные сверточные сети. Так, модель могла бы различать сложные позы (человек с поднятой рукой или сидящий человек), предсказывать действия объектов на изображении и принимать решения, выходящие далеко за пределы тех, на которые способны модели с инвариантной индикацией объектов.

Среди преимуществ рассмотренной модели обучения можно назвать следующие:

полное отсутствие необходимости в учителе – модель способна работать с любыми трехмерными объектами, для которых существуют участки неоднородности;

результаты, опробованные на человеческих лицах и моделях геометрических тел, показывают эффективность идентификации искомым объектов, сопоставимую с существующими моделями, такими как [13] (для сопоставления использовалась база LFW);

трансформирующие автоассоциаторы – новый, но сравнительно известный алгоритм, успевший продемонстрировать успешные результаты как в области компьютерного зрения, так и в других сферах машинного обучения.

Среди недостатков, в первую очередь, имеет смысл отметить слабую изученность теоретических оснований эквивариантного обучения (трансформирующий автоассоциатор на данный момент – единственная достаточно известная архитектура, решающая эту задачу). Некоторые авторы [5] отмечают неспособность трансформирующего автоассоциатора справляться с определенными категориями трансформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Deng J. et al.** Imagenet: A large-scale hierarchical image database //Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Conf. on. 2009. Pp. 248–255.
2. **Hinton G.E., Krizhevsky A., Wang S.D.** Transforming auto-encoders //Artificial Neural Networks and Machine Learning. Springer Berlin Heidelberg, 2011. Pp. 44–51.
3. **Kivinen J.J., Williams C.K.I.** Transformation equivariant Boltzmann machines //Artificial Neural Networks and Machine Learning. Springer Berlin Heidelberg, 2011. Pp. 1–9.
4. **Jaitly N., Hinton G.E.** A new way to learn

acoustic events //Advances in Neural Information Processing Systems. 2011. Vol. 24.

5. **Wang S.** Learning to Extract Parameterized Features by Predicting Transformed Images. 2011.

6. **Underwood G., Foulsham T.** Visual saliency and semantic incongruity influence eye movements when inspecting pictures //The Quarterly journal of experimental psychology. 2006. Vol. 59. No. 11. Pp. 1931–1949.

7. **Liu J., White J.M., Summers R.M.** Automated detection of blob structures by Hessian analysis and object scale //Image Processing. 17th IEEE Internat. Conf. on. 2010. Pp. 841–844.

8. **Shao L., Kadir T., Brady M.** Geometric and photometric invariant distinctive regions detection // *Information Sciences*. 2007. Vol. 177. No. 4. Pp. 1088–1122.

9. **Fei-Fei L., Fergus R., Perona P.** One-shot learning of object categories // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 2006. Vol. 28. No. 4. Pp. 594–611.

10. **Fe-Fei L., Fergus R., Perona P.** A Bayesian approach to unsupervised one-shot learning of object categories // *Computer Vision, 2003. Proc. 9th IEEE Internat. Conf. on*. 2003. Pp. 1134–1141.

11. **George D., Jaros B.** The HTM learning algorithms [Электронный ресурс] URL: http://numenta.com/for-developers/education/Numenta_HTM_Learning_Algos.pdf

12. **Mae Y. et al.** Object tracking in cluttered background based on optical flow and edges // *Pattern Recognition, Proc. of the 13th Internat. Conf. on. IEEE*. 1996. Vol. 1. Pp. 196–200.

13. **Lienhart R., Maydt J.** An extended set of haar-like features for rapid object detection // *Image Processing. Proc. Internat. Conf. on. IEEE*. 2002. Vol. 1. – Pp. I-900-I-903.

14. **Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.** Imagenet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in neural information processing systems*. 2012. Pp. 1097–1105.

15. **Jia Y. et al.** Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding // *Proc. of the ACM Internat. Conf. of Multimedia*. 2014. Pp. 675–678.

REFERENCES

1. **Deng J. et al.** Imagenet: A large-scale hierarchical image database. *Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Conference on*, 2009, Pp. 248–255.

2. **Hinton G.E., Krizhevsky A., Wang S.D.** Transforming auto-encoders. *Artificial Neural Networks and Machine Learning*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, Pp. 44–51.

3. **Kivinen J.J., Williams C.K.I.** Transformation equivariant Boltzmann machines. *Artificial Neural Networks and Machine Learning*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, Pp. 1–9.

4. **Jaitly N., Hinton G.E.** A new way to learn acoustic events. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2011, Vol. 24.

5. **Wang S.** *Learning to Extract Parameterized Features by Predicting Transformed Images*, 2011.

6. **Underwood G., Foulsham T.** Visual saliency and semantic incongruity influence eye movements when inspecting pictures. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 2006, Vol. 59, No. 11, Pp. 1931–1949.

7. **Liu J., White J.M., Summers R.M.** Automated detection of blob structures by Hessian analysis and object scale. *Image Processing 17th IEEE International Conference on*, 2010, Pp. 841–844.

8. **Shao L., Kadir T., Brady M.** Geometric and photometric invariant distinctive regions detection. *Information Sciences*, 2007, Vol. 177, No. 4, Pp. 1088–1122.

9. **Fei-Fei L., Fergus R., Perona P.** One-shot learning of object categories. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2006, Vol. 28, No. 4, Pp. 594–611.

10. **Fe-Fei L., Fergus R., Perona P.** A Bayesian approach to unsupervised one-shot learning of object categories. *Computer Vision, Proceedings 9th IEEE International Conference on. IEEE*, 2003, Pp. 1134–1141.

11. **George D., Jaros B.** The HTM learning algorithms. Available: http://numenta.com/for-developers/education/Numenta_HTM_Learning_Algos.pdf

12. **Mae Y. et al.** Object tracking in cluttered background based on optical flow and edges. *Pattern Recognition, Proceedings of the 13th International Conference on, IEEE*, 1996, Vol. 1, Pp. 196–200.

13. **Lienhart R., Maydt J.** An extended set of haar-like features for rapid object detection. *Image Processing, Proceedings International Conference on, IEEE*, 2002, Vol. 1, Pp. I-900-I-903.

14. **Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.** Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, Pp. 1097–1105.

15. **Jia Y. et al.** Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia*, 2014, Pp. 675–678.

ХУРШУДОВ Артем Александрович – аспирант кафедры информационных систем и программирования 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

DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.10

УДК 004.923

А.А. Хуршудов

**ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ КАРТ ПРИЗНАКОВ
НА ОСНОВЕ ВИДЕОФРАГМЕНТОВ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА**

A.A. Khurshudov

**CONSTRUCTING 3D FEATURE MAPS FROM VIDEO SEQUENCES
BY OPTIC FLOW ESTIMATION**

Рассмотрена обобщенная задача воссоздания трехмерной структуры объектов из набора видеофрагментов, на которых изображена заданная сцена. В отличие от распространенных методов фотограмметрии, широко используемых для решения подобных задач, рассматриваемый метод не требует знания параметров камеры, способен работать с любыми категориями согласованных видеофрагментов и справляться с высокими показателями шума. В процессе реконструкции объект представляется как совокупность устойчивых разреженных признаков в трехмерном пространстве, которые первоначально обнаруживаются в отдельных ключевых кадрах (например, с помощью детектора углов Ши-Томаси), затем с помощью разреженного оптического потока их перемещения отслеживаются в последующих кадрах. При наличии информации о движении камеры при помощи простейших геометрических расчетов становится возможным определить положение интересующей точки в пространстве, а многократное определение позиции для одной и той же точки в различных кадрах видео позволяет эффективно устранять погрешности оценки. Помимо разреженного оптического потока (метод Лукаса–Канаде), метод также использует некоторые свойства плотного потока (метод Фарнебака), позволяющие осуществлять сегментацию сцен и выделение объектов на разных уровнях глубины сцены. Полученные трехмерные карты признаков в дальнейшем могут использоваться в качестве макродетектора объектов на отдельных цифровых изображениях, устойчивого к инвариантным трехмерным трансформациям.

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ; ОПТИЧЕСКИЙ ПОТОК; АЛГОРИТМ ЛУКАСА–КАНАДЕ; РАЗРЕЖЕННЫЕ ПРИЗНАКИ; СЕГМЕНТАЦИЯ МЕТОДОМ ВОДОРАЗДЕЛА.

The study presents a general case of structure-from-motion problem where the given data consists of a bunch of video sequences filmed in the same scene. Unlike the popular methods of photogrammetry and bundle adjustment, the proposed solution does not required specific knowledge of intrinsic camera parameters, could be applied to any type of consistent motion pictures and can handle large amounts of noise. During the process of reconstruction an object is viewed as a 3D map of robust sparse features, which at first hand are discovered in certain key frames (using existent computer vision techniques like Shi-Tomasi corner detector) and afterwards tracked across the following frames using sparse optic flow method. When camera motion (egomotion) data is available, it is became possible to estimate each feature's depth by using simple geometric properties of two-image disparity, and having each feature estimated from multiple video frames allows to effectively filter out the noise. Apart from sparse Lucas-Kanade optic flow the study also makes use of some properties of dense optic flow (Gunnar Farneback's algorithm), which is used for scene segmentation during the camera motion. The resulting 3D feature maps are designed to be used as a macro object detector that could be applied to any previously unknown single digital images, representing structures

that are believed to store 3D visual memory of an object, and therefore being able to detect objects in spite of general invariant scene transformations.

OBJECT DETECTION; OPTICAL FLOW; LUCAS–KANADE ALGORITHM; SPARSE FEATURES; WATERSHED SEGMENTATION.

Задача определения объекта в сцене, представленной одиночным цифровым изображением, является одной из основных проблем, рассматриваемых в домене компьютерного зрения. Обобщенный подход к решению этой проблемы представляет собой поиск отдельных локальных участков изображения, однозначно соответствующих искомому объекту, так называемых признаков объекта. Существует значительное количество методов обнаружения признаков, устойчивых к различным искажениям, которым может подвергаться изображение, включающих в себя случайный шум, размытие, помехи и сдвиг камеры. Наиболее известные методы в этой области представлены детектором углов Харриса, детектором Ши-Томаси [1], методами SIFT, SURF и другими [2, 3].

Однако представление объекта в виде композиции признаков изображения имеет некоторые существенные недостатки, наиболее известным из которых оказывается изменение формы объекта в ходе ин-

вариантных преобразований в трехмерном пространстве – перемещения, трансляции камеры, поворота угла обзора или масштабирования. Трехмерная природа окружающего мира вынужденно делает невозможным полноценное однозначное описание интересующего объекта с помощью двумерных признаков в отдельной проекции изображения. Существует ряд гибридных попыток обойти эту проблему. Так, дескриптор SIFT представляет собой один из первых высокоэффективных детекторов, инвариантных к масштабированию, а дескрипторы SURF и ORB обеспечивают устойчивость к повороту изображения. Для решения представленной задачи также с успехом используются методы машинного обучения, в которых признаки, как правило, подобраны вручную так, чтобы выражать наиболее существенные детали изображенного объекта. Но ни один из существующих методов не предназначен для обобщенного обнаружения объекта в случае его трансформации внутри сцены.

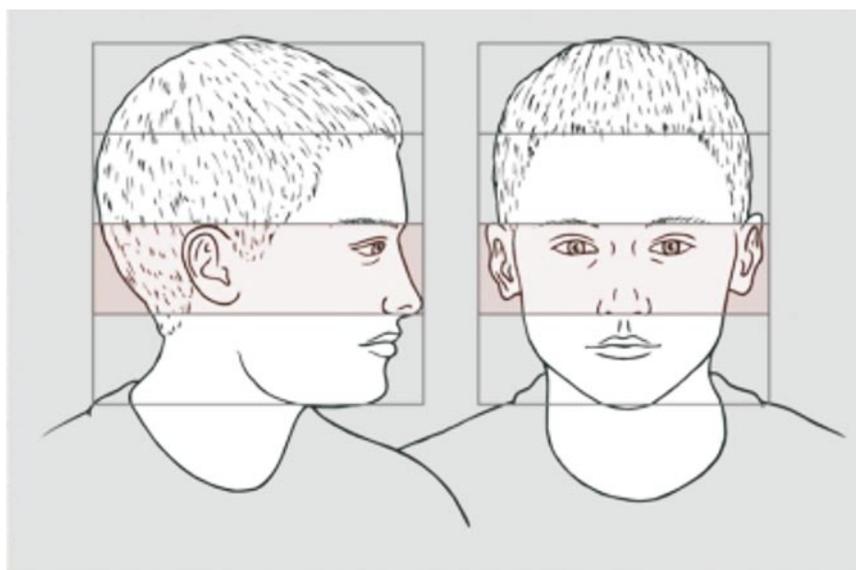


Рис. 1. Пример инвариантного преобразования, меняющего составной набор характерных признаков объекта

Так, если частным случаем рассматриваемой задачи является обнаружение человеческих лиц на фотографиях, адекватным способом выбора признаков представляется сочетание характерных элементов лица, таких как глаза, нос, рот. Простой поворот объекта, однако, способен изменить внешний вид перечисленных признаков, часть из которых пропадает из поля зрения целиком (рис. 1).

Пространство возможных инвариантных трансформаций отдельного объекта ограничено, и алгоритм обнаружения можно расширить экстенсивно, пополнив его необходимыми комбинациями признаков для каждой позиции камеры. Признавая общую жизнеспособность такого подхода, данная статья предлагает альтернативный способ, заключающийся в предварительном составлении модели объекта, представляющей собой карту признаков в трехмерном пространстве. Предложенный метод, таким образом, состоит из двух стадий.

1. Стадия накопления опыта. Объект изучается алгоритмом с различных углов зрения, составляется трехмерная модель с нанесенными на ее поверхность признаками.

2. Стадия обнаружения. Полученную модель можно использовать в качестве дестектора для отдельных изображений, сопоставляя ключевые точки модели с признаками изображения. Для этой подзадачи существует ряд широко известных и эффективных методов, таких как «перспектива по n точкам» (Efficient PnP [4]). Успешное сопоставление модели позволяет не только обнаружить объект, но и оценить его удаленность от камеры и ориентацию в пространстве.

Для получения трехмерной модели в общем случае можно пользоваться множеством методов, включающих в себя специализированные устройства 3D-сканирования, бинокулярные камеры и дальномеры, но большая часть подобных решений ограничена как по стоимости, так и по области применения. Предлагаем использовать для этой цели извлечение информации о трехмерном положении точек с помощью оптического потока [5] — ме-

тод, имеющий потенциально наиболее широкий домен использования.

Использование оптического потока для определения смещений точек

Рассмотрим фрагмент видео: последовательность кадров, ориентированную по оси времени, и некоторые точки изображения, представленные значениями координат и времени $I(x, y, t)$. Тогда при условии, что видео изображает движение в рамках одной и той же сцены, можно ожидать, что в кадре $t + \Delta t$ точка I сместится на некоторые значения Δx и Δy :

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t).$$

Применение к этому выражению аппроксимации с помощью ряда Тейлора дает уравнение оптического потока [6]:

$$f_x u + f_y v + f_t = 0,$$

где $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$, $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$, $u = \frac{\partial x}{\partial t}$, $v = \frac{\partial y}{\partial t}$.

Если описанный видеофрагмент получен при помощи плавного движения камеры в статичной сцене, то знание смещений камеры в сторону дает возможность выразить расстояние до точки (рис. 2):

$$d = \frac{Tf}{\Delta x}, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние камеры; T — шаг камеры; Δx — смещение точки на изображении, значение оптического потока по оси x .

Для получения абсолютного значения дистанции до объекта необходимы, таким образом, следующие данные:

- направление движения камеры. Можно оценить по направлению общего смещения объектов в кадре, с помощью оптического потока (задача усложняется, если в кадре присутствуют автономно движущиеся объекты). Для отдельных классов задач информацию о движении камеры можно получать напрямую от моторных элементов, управляющих движением;

- шаг камеры. Приняв допущение о том, что покадровая съемка ведется с высокой частотой, в упрощенном случае можно считать шаг камеры равным единице.

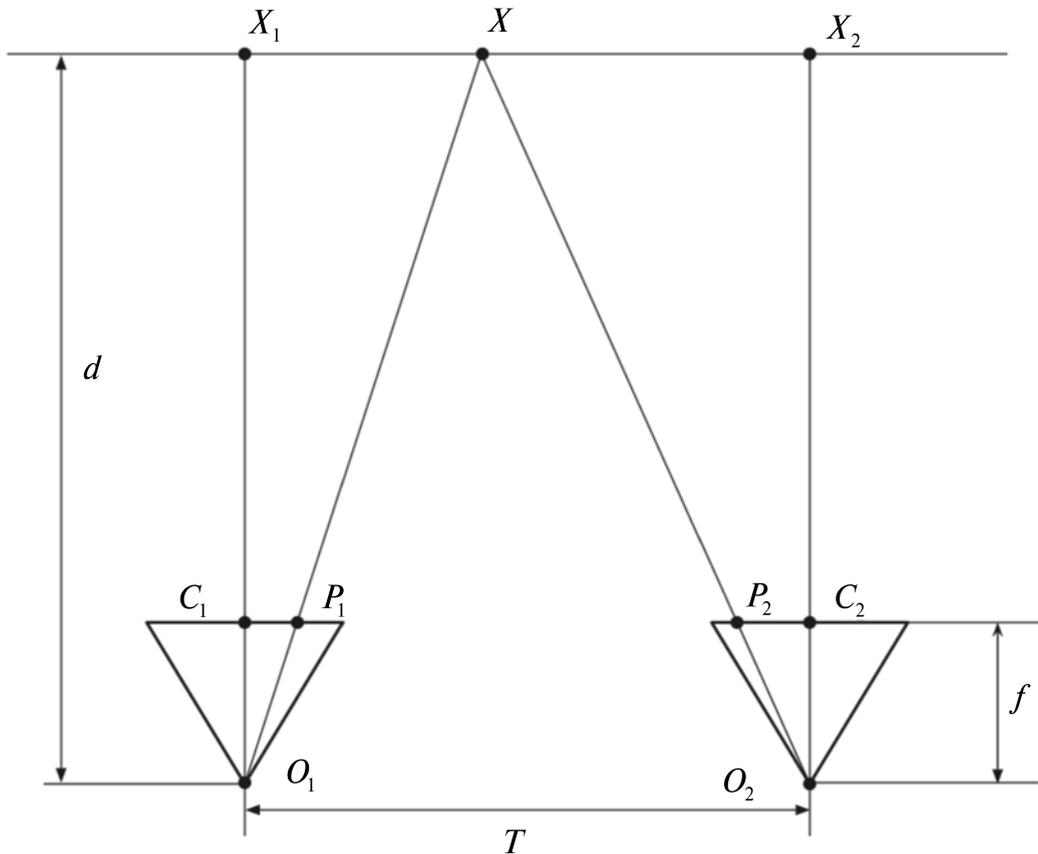


Рис. 2. Горизонтальный сдвиг камеры $\Delta O_1 C_1 P_1 \Delta O_1 X_1 X$, $\Delta O_2 C_2 P_2 \Delta O_2 X_2 X$

Отклонения в движении и рывки камеры должны обрабатываться отдельно либо отслеживаться и отбрасываться;

- фокусное расстояние камеры. Для случаев, когда информация о внутренних технических параметрах камеры недоступна, оценить фокусное расстояние можно при повороте камеры (рис. 3).

Для оценки воспользуемся двумя значениями дистанции d и d_{rot} , рассчитанными по формуле (1). Таким образом, координата искомой точки может быть выражена как

$$X = \frac{d \left(x - \frac{w}{2} \right)}{f};$$

$$X_{rot} = \frac{d_{rot} \left(x_{rot} - \frac{w}{2} \right)}{f}.$$

где X , X_{rot} – координата искомой точки в

трехмерном пространстве по оси x относительно положения камеры; w – ширина изображения в пикселях.

Если абсолютные координаты центра камеры равны (X_0, Y_0, Z_0) , то абсолютную координату X_a искомой точки можно выразить двумя способами:

$$X_a = X + X_0,$$

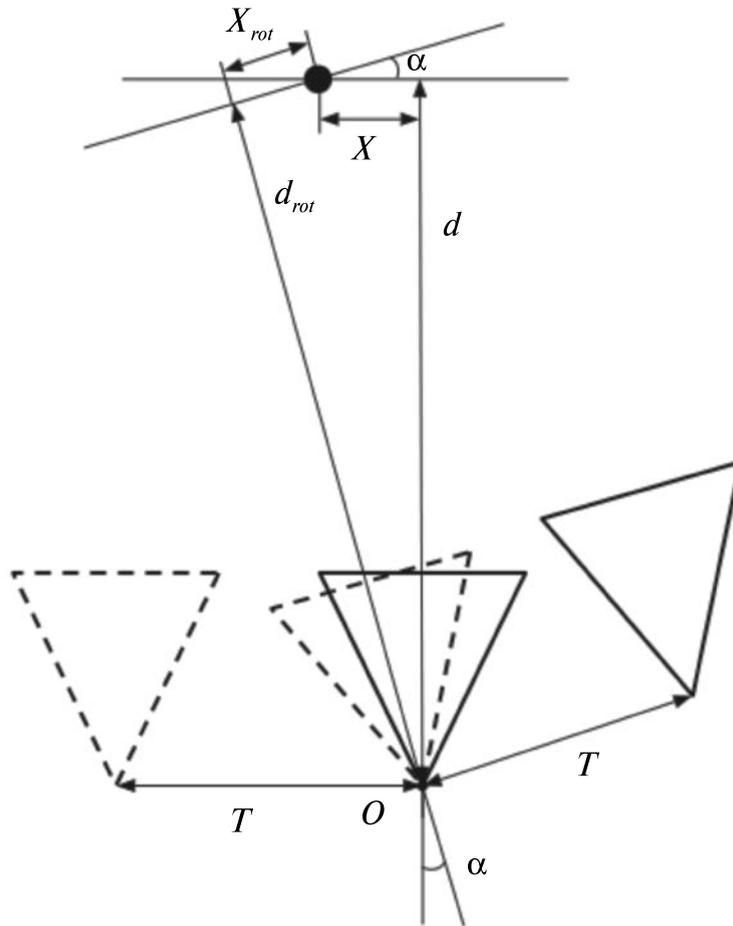
$$X_a = X_{rot} \cos \alpha - d_{rot} \sin \alpha + X_0,$$

$$\frac{d \left(x - \frac{w}{2} \right)}{f} = \frac{d_{rot} \left(x_{rot} - \frac{w}{2} \right)}{f} \cos \alpha - d_{rot} \sin \alpha.$$

Таким образом, фокусное расстояние можно определить следующим образом:

$$f = \frac{d_{rot} \left(x_{rot} - \frac{w}{2} \right) \cos \alpha - d \left(x - \frac{w}{2} \right)}{d_{rot} \sin \alpha}. \quad (2)$$

Для видеофрагментов, где отсутствуют

Рис. 3. Поворот камеры в движении на угол α

повороты камеры, значение фокусного расстояния влияет только на пропорцию общей глубины сцены и не приводит к рассогласованиям оценок положения точек. Для таких случаев фокусное расстояние может быть выбрано произвольно.

Идеальный случай

В идеальном случае видеофрагмент должен удовлетворять следующим условиям:

искомый объект изображен на нем достаточно полно и со всех сторон;

камера перемещается одинаковыми шагами;

направление движения камеры всегда известно, при поворотах камеры известен точный угол поворота.

Рассмотрим следующий алгоритм:

1. Получить для первого кадра набор точек f с помощью детектора углов (детектор

Харриса или детектор Ши-Томаси). Определить пустой массив R .

2. До тех пор, пока количество кадров не исчерпано:

2.1. Для текущей ориентации (угла) камеры задать стек устойчивых признаков S , инициализировать его полученным набором точек p . Установить $c = 0$.

2.2. До тех пор, пока S не пусто или камера не совершила поворот:

2.2.1. В каждом последующем кадре найти смещения для последнего элемента R с помощью оптического потока Лукаса–Канаде [7].

2.2.2. Те точки, смещение которых найти не удалось, исключаются из S вместе с предшествующими им.

2.2.3. Добавить обнаруженные смещения в S .

2.2.4. Инкрементировать c .

2.3. Полученный массив R содержит некоторое количество оценок смещений для одних и тех же точек, наблюдавшихся в пределах с последовательных кадров. С помощью формулы (1), принимая $T = 1$ и произвольное f , перевести значения смещений в значения глубины d .

2.4. Полученный массив значений dc отфильтровать по Гауссу, оставив значения в пределах трех стандартных отклонений. Получить усредненную оценку координат искомым точек, усреднив значения dc . Добавить полученные точки в общий массив R .

2.5. При повороте камеры с помощью формулы (2) определить фокусное расстояние. При необходимости скорректировать обнаруженные на предыдущем шаге координаты на новое значение f .

3. Для каждого элемента R_i массива R :

3.1. Для каждой точки в R_i найти ближайшего соседа среди других элементов R_k , где $k \neq i$.

3.2. Получить окончательные значения пространственных координат обнаруженных точек, усреднив координаты ближайших соседей.

Результаты работы алгоритма (восстановленные карты признаков) приведены на рис. 4. Для оценки результатов использовались модели-образцы, полученные при помощи компьютерной графики.

Варьирование параметров детектора углов способно дать на выходе как максимально разреженную карту (так, в примере куб представляется исключительно своими углами), так и относительно плотную, в за-

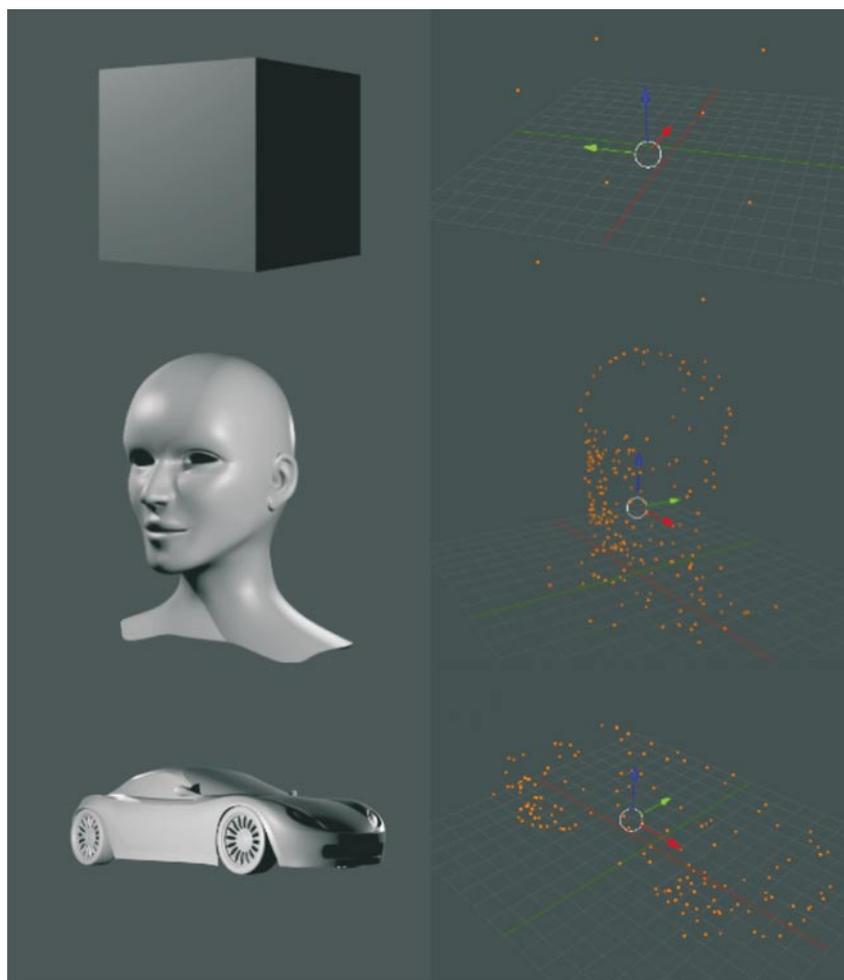


Рис. 4. Некоторые примеры карт признаков, восстановленных по изображениям. Слева – искомый трехмерный объект, справа – карта признаков, представляющая собой разреженное облако точек



висимости от количества точек, обнаруженных детектором углов. Следует отметить, что для задачи классификации и распознавания получение максимально плотного облака точек не только не является желаемым результатом, но и представляет потенциальные проблемы при использовании полученных данных в классификаторе. Идеальная карта признаков должна содержать только то минимальное количество точек, которое с гарантией позволяет идентифицировать объект в кадре.

Прикладное использование и сегментация объектов

При использовании алгоритма в реальных условиях, когда входной видеоснимок представляет собой данные физического устройства камеры, указанные выше ограничения идеального случая с высокой вероятностью будут нарушаться. Кроме того, съемка естественных сцен, как правило, содержит несколько объектов в одной сцене, что делает необходимым проведение предварительной сегментации сцены и выделение отдельных предметов. Для решения этих подзадач воспользуемся методом расчета плотного оптического потока Фарнебака [8].

В отличие от метода Лукаса–Канаде, метод Фарнебака рассчитывает значение оптического потока для каждой точки изображения. В силу недостаточно точных приближений, он непригоден для воссоздания трехмерной формы объекта, но может ис-

пользоваться для оценки движения камеры.

На рис. 5 изображены примеры рассчитанного потока Фарнебака для различных случаев движения, где цвет пикселя определяет направление вектора потока в точке. Для оценки движения камеры необходимо определить локальные максимумы потока, после чего, в зависимости от выбранного пространства возможных смещений камеры, использовать подходящий метод принятия решений. В данной работе для шести типов движения (четыре указанных выше плюс повороты камеры влево и вправо) высокую эффективность показал метод логистической регрессии [9], обученной на предварительно составленной выборке, позволивший добиться точности определения направления в 87 %. Результат можно улучшить, принимая во внимание инерцию движения камеры: таким образом, несколько соседних кадров с высокой вероятностью должны принадлежать одному и тому же вектору смещения. Усреднение показателей регрессии с окном в три кадра повышает точность до 94 %.

Для определения длины шага между двумя отдельными камерами, в случае существования соответствующей неопределенности, необходимо отслеживать точки, для которых разреженный поток рассчитывается с высокой надежностью (т. е. направление вектора потока Лукаса–Канаде согласуется с эвристическим предсказанием движения камеры по методу Фарнебака). В ситуации, когда шаги камеры одинаковы,



Рис. 5. Плотный оптический поток для различных случаев движения камеры, последовательно: влево, вправо, вперед и назад. Цвета обозначают направление движения потока

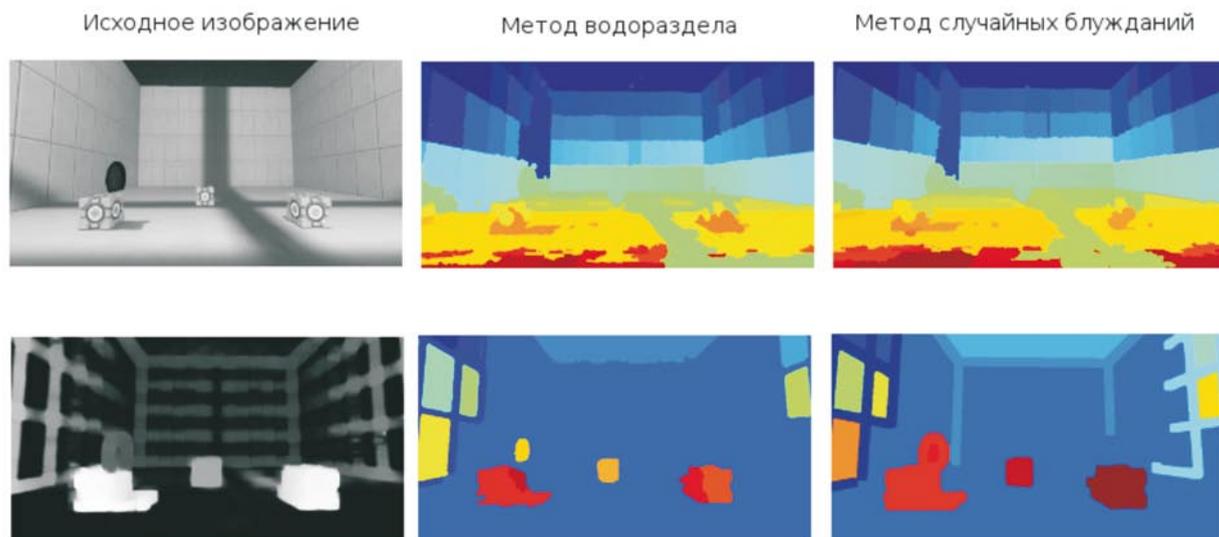


Рис. 6. Сравнение классической сегментации методом водораздела и совмещенной с потоком Фарнебака

смещения надежных точек должны быть также одинаковы. В случае, когда это условие не выполняется в определенных парах кадров, соответствующий шаг между ними должен быть отмасштабирован на относительную разницу смещения. Для определения надежных точек и их смещений могут использоваться как подмножество устойчивых точек, определяемых детектором Ши-Томаси на первом шаге алгоритма.

Для сегментации сцены на отдельные объекты существует несколько распространенных методов. Учитывая специфику задачи (необходимость обеспечить автономную работу алгоритма и устойчивость к инвариантным условиям среды, таким как освещение), исключим из рассмотрения методы, требующие участия человека (GrabCut), и методы на основе спектральных кластеров (K-means, spectral decision boundary) и рассмотрим методы управляемого водораздела (watershed segmentation) [10] и случайных блужданий (random walker segmentation) [11]. Предлагаем совместить использование сегментации с данными потока Фарнебака, воспользовавшись эффектом параллакса движения, который дает возможность окрашивания объектов в зависимости от их удаления от камеры. Этот метод позволяет снизить погрешность сегментации и избе-

витель от ложных сегментов, полученных в ходе наличия на объектах поверхностных текстур. Таким образом, различимыми объектами в ходе совмещенной сегментации должны оказываться предметы, испытывающие различные значения смещений в кадре.

Рис. 6 позволяет оценить эффективность предложенного метода. Верхняя часть демонстрирует результат работы приведенных выше алгоритмов на исходном изображении, а нижняя – на изображении, полученном из абсолютных значений потока Фарнебака. Видно, что совмещенная сегментация позволяет с уверенностью выделять отдельные объекты в ситуациях, где классическая сегментация не способна их обнаружить: например, в случае, когда цвет объекта схож с цветом фона.

Предложено решение задачи воссоздания структуры объектов по вторичным данным. Рассмотренный метод может использоваться для задач компьютерного зрения, таких как обнаружение препятствий, 3D-реконструкция сцен, создание эффектов дополненной реальности. Однако основным прикладным применением метода, по нашему мнению, является возможность использования полученных трехмерных



карт признаков для задач распознавания и машинного обучения. Полученные карты признаков могут использоваться в качестве входных данных для интеллектуальных анализаторов, таких как нейронные сети и модели глубокого обучения. Учитывая то, что предложенный метод требует наличия только сенсора захвата движений, построение карт признаков может производиться в течение всего цикла деятельности интеллектуального агента (беспилотного аппарата, камеры слежения и т. д.), играя, таким образом, роль массива визуального опыта. Способность опознавать объект в кадре и

сопоставлять его с изученной заранее разреженной трехмерной моделью дает потенциальную возможность полностью решить проблему инвариантных трехмерных преобразований.

Дальнейшим логическим шагом развития метода построения трехмерных карт признаков представляется разработка модели пространственной иерархии, делающая возможным применение отдельной карты для распознавания множества объектов одного класса и допускающая изменчивость отдельных признаков на локальном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tommasini T. et al.** Making good features track better // *Computer Vision and Pattern Recognition. Proc. IEEE Computer Society Conf.*, 1998. Pp. 178–183.
2. **Lowe D.G.** Object recognition from local scale-invariant features // *Computer vision. Proc. of the 7th IEEE Internat. Conf.* 1999. Vol. 2. Pp. 1150–1157.
3. **Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L.** Surf: Speeded up robust features // *Computer vision—ECCV*. Springer Berlin–Heidelberg, 2006. Pp. 404–417.
4. **Nistér D.** An efficient solution to the five-point relative pose problem // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 2004. Vol. 26. No. 6. Pp. 756–770.
5. **Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S.** Performance of optical flow techniques // *Internat. J. of Computer Vision*. 1994. Vol. 12. No. 1. Pp. 43–77.

6. **Warren W.H., Hannon D.J.** Direction of self-motion is perceived from optical flow // *Nature*. 1988. Vol. 336. No. 6195. Pp. 162–163.
7. **Lucas B.D. et al.** An iterative image registration technique with an application to stereo vision // *IJCAI*. 1981. Vol. 81. Pp. 674–679.
8. **Farneback G.** Two-frame motion estimation based on polynomial expansion // *Image Analysis*. Springer Berlin–Heidelberg, 2003. Pp. 363–370.
9. **Giunta G., Mascia U.** Estimation of global motion parameters by complex linear regression // *Image Proc. IEEE Transactions on*. 1999. Vol. 8. No. 11. Pp. 1652–1657.
10. **Beucher S. et al.** The watershed transformation applied to image segmentation // *Scanning Microscopy—Supplement*. 1992. Pp. 299–299.
11. **Grady L.** Random walks for image segmentation // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 2006. Vol. 28. No. 11. Pp. 1768–1783.

REFERENCES

1. **Tommasini T. et al.** Making good features track better, *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings IEEE Computer Society Conference on*, 1998, Pp. 178–183.
2. **Lowe D.G.** Object recognition from local scale-invariant features, *Computer vision. The Proceedings of the 7th IEEE International Conference on*, 1999, Vol. 2, Pp. 1150–1157.
3. **Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L.** Surf: Speeded up robust features, *Computer vision—ECCV*, Springer Berlin–Heidelberg, 2006, Pp. 404–417.
4. **Nistér D.** An efficient solution to the five-point relative pose problem, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2004, Vol. 26, No. 6. Pp. 756–770.
5. **Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S.** Performance of optical flow techniques, *International*

- Journal of Computer Vision*, 1994, Vol. 12, No. 1, Pp. 43–77.
6. **Warren W.H., Hannon D.J.** Direction of self-motion is perceived from optical flow, *Nature*, 1988, Vol. 336, No. 6195, Pp. 162–163.
7. **Lucas B.D. et al.** An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *IJCAI*, 1981, Vol. 81, Pp. 674–679.
8. **Farneback G.** Two-frame motion estimation based on polynomial expansion, *Image Analysis*. Springer Berlin–Heidelberg, 2003, Pp. 363–370.
9. **Giunta G., Mascia U.** Estimation of global motion parameters by complex linear regression, *Image Processing, IEEE Transactions on*, 1999, Vol. 8, No. 11, Pp. 1652–1657.
10. **Beucher S. et al.** The watershed transformation

applied to image segmentation, *Scanning Microscopy-Supplement*, 1992, Pp. 299–299.

11. **Grady L.** Random walks for image

segmentation, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2006, Vol. 28, No. 11, Pp. 1768–1783.

ХУРШУДОВ Артем Александрович – аспирант кафедры информационных систем и программирования 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



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.11

УДК 62.50 + 517.11 + 519.92

М.А. Марценюк, И.П. Селетков

НЕЧЕТКИЙ КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

М.А. Martsenyuk, I.P. Seletkov

FUZZY CELLULAR AUTOMATA FOR TEMPERATURE FIELD CONTROL

Рассмотрены модели клеточного автомата без памяти и с памятью, построенные с использованием нечеткой логики. Показано, что использование методов нечеткой логики в моделях клеточных автоматов позволяет повысить гибкость алгоритмов, упростить формализацию знаний эксперта. Для всех вычислений применен матричный подход нечеткой логики, позволяющий упростить реализацию алгоритма и уменьшить требования к вычислительным ресурсам. В качестве конкретного примера обсуждена задача расчета динамического изменения поля температуры с заданными граничными условиями. Показано как предложенные модели позволяют учитывать эффект температурной памяти, а также как полученные результаты могут использоваться при решении более сложной задачи управления полем температуры.

НЕЧЕТКАЯ КЛЕТОЧНАЯ КОМБИНАЦИОННАЯ СХЕМА; НЕЧЕТКИЙ КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ С ПАМЯТЬЮ; УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ; ЭФФЕКТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАМЯТИ; МАТРИЧНЫЙ МЕТОД НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.

The article considers the models of memoryless and memory-powered cellular automata based on fuzzy logic. It shows that the use of fuzzy logic methods in cellular automata algorithms allows increasing greater flexibility and simplifying the formalization of expert knowledge. We have discussed the problem how to calculate the dynamic changes of the temperature field with the given boundary conditions. A matrix approach of fuzzy logic has been used for all calculations. This approach simplifies the implementation of the algorithm and reduces the requirements for computational resources. We have also shown how to take into account temperature memory and how the results could be applied to solve a more complex problem of a temperature field control.

FUZZY CELLULAR MEMORYLESS AUTOMATA; FUZZY CELLULAR AUTOMATA WITH MEMORY; TEMPERATURE FIELD CONTROL; TEMPERATURE MEMORY; MATRIX APPROACH OF FUZZY LOGIC.

Понятие «клеточного автомата» (КА) было впервые введено Дж. фон Нейманом [1] для реалистичного моделирования пространственно-протяженных систем [2]. В последние десятилетия предложенные модели получили особенно значительное распространение в таких областях, как моделирование химических и биологических процессов [3, 4], решение задач математической физики, обработка изображений [5, 6], моделирование социальных систем [7] и мн. др. Обзор современных применений модели клеточных автоматов для решения научных и технических задач представ-

лен в книгах [8, 9] и других источниках.

В отличие от моделей, использующих уравнения математической физики, при работе с КА-моделями не приходится иметь дело с оценками точности расчета, сходимостью процедур и устойчивостью численных схем. Вычисления, производимые при запуске КА (будем считать, что они выполняются некоторой КА-машиной), всегда являются точными. Массив клеток КА можно рассматривать как своего рода «ленту» (вообще говоря многомерную), подобную той, которая используется в машине Тьюринга. На каждом шаге вычислений

(производимых в момент времени t) «головка» КА-машины обходит весь массив клеток и переводит его в другое «состояние». Успех моделей систем, представляемых как КА, определяется тем, что для их функционирования только необходимо знать, по какой программе работает «головка» этой КА-машины. В результате поведение сложной системы вырастет, как из семени, из заданной программы работы головки, в которой скрывается сама суть модели рассматриваемой системы.

Как отмечает в своем предисловии к книге [10] известный эксперт в теории КА профессор Т. Тоффоли (Т. Toffoli), 50 лет исследований выявили, что КА-модели систем в своей основе служат *концептуальным инструментом познания*. Эти исследования также выявили особое место КА: они вносят наибольший вклад в понимание сложных систем на стадии разработки их концептуальных моделей.

Перейдем теперь к более детальному описанию КА. Клеточный автомат состоит из упорядоченного массива данных (клеток) $C = \{C_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, описывающих поле $C(t)$ (пространственное распределение) исследуемой величины в текущий момент времени t . Далее для простоты (но без ограничения общности) считается, что размерность $\dim(C) = 1$. Обработка массива $C(t)$ логическим автоматом по единому набору правил f позволяет вычислить массив в последующий момент времени $t + \Delta t$: $C(t + \Delta t) = f(C(t))$. Здесь и далее мы отличаем понятия «клеточный автомат» (КА) и «логический автомат» (ЛА): КА включает в себя массив $C(t)$ и способ его обработки – ЛА, то есть $КА = C(t) + ЛА$. Функцию f часто называют правилом работы автомата.

Было предложено несколько алгоритмов работы логического автомата.

- Автомат без памяти или комбинационная схема (КС), действующая по четко определенным правилам (ЧКС). Эта модель автомата является наиболее распространенной [8].

- В последнее время появились также модели, основанные на использовании четких автоматов с памятью (ЧАП) [11].

Однако четкие модели не охватывают всех возможностей применения клеточных автоматов. Поэтому были начаты разработки моделей клеточных автоматов с нечетким управлением, в основе которых лежит нечеткая комбинационная схема (НКС) [12, 13].

Цель данной работы – развитие теории клеточных автоматов, в которых для обработки массива используются нечеткие комбинационные схемы и нечеткие автоматы с памятью (НАП). В [14] показано, что функционирование нечеткого автомата с конечной памятью может быть представлено нечеткой комбинационной схемой с блоком внешней памяти. В [14, 15] также показано, что работа нечеткой схемы и нечеткого автомата задается некоторой четкой системой операций над нечеткими множествами.

План работы следующий. Первоначально вводится удобная для дальнейшего формализация описания обычного КА (клеточного автомата с ЧКС). Затем она обобщается для клеточного автомата, функционирующего на основе нечеткой клеточной комбинационной схемы и нечеткого клеточного автомата. В качестве содержательного примера рассмотрена задача о моделировании нестационарного поля температуры в среде, обладающей тепловой памятью. Как показано в работах [16–18], уравнение теплопроводности в общем случае содержит слагаемые, зависящие от температуры среды в предшествующие моменты времени. Такое уточнение классической схемы теплопроводности оказывается необходимым для решения задач прецизионного управления температурой высокоточных систем.

Модель клеточного автомата

Клеточные автоматы являются дискретными динамическими системами. Пространство предметной области или поле исследуемой величины представлено равномерной сеткой, каждая ячейка которой, или клетка, содержит информацию о ее состоянии, время идет вперед дискретными шагами. Полное число состояний, в которых может находиться клетка, является конечным. Правила, по которым рассчитываются новые состояния клеток, заданы

единым образом, например, небольшой таблицей переходов. Законы системы являются локальными и повсюду одинаковыми [2].

Формально клеточный автомат может быть записан как кортеж из четырех величин [8]:

$$\{C, S, r, f\}, \quad (1)$$

где C – множество ячеек автомата; S – множество возможных состояний ячейки, например, $S = \{0, 1\}$; r – характерный размер окрестности O ячейки, рассматриваемой в данный момент времени t и находящейся в состоянии s^t . Новое состояние этой ячейки $s^{t+\Delta t}$ задается состояниями всех ячеек, лежащих внутри ее окрестности O , с помощью функции переходов f , которая (в одномерном случае) осуществляет отображение

$$f : \{0, 1\}^{2r+1} \rightarrow \{0, 1\}. \quad (2)$$

В частном случае, когда $r = 1$, для управления переходами i -й ячейки используется набор ячеек с номерами $i-1, i, i+1$, и s_i^t – состояние ячейки с номером i в момент времени t определяется формулой

$$s_i^{t+\Delta t} = f(s_{i-1}^t, s_i^t, s_{i+1}^t). \quad (3)$$

Задав начальные (т. е. при $t = 0$) состояния всех клеток $s_i^{t=0}$, можно проследить дальнейшую эволюцию массива с течением времени. Многочисленные содержательные примеры представлены в [8, 9].

Клеточный автомат, работа которого описывается правилами вида (3), не обладает памятью [11], т. к. вычисления новых состояний ячеек выполняются комбинационной схемой. Для получения большей гибкости моделей используют также клеточные автоматы с памятью. При этом новое содержимое каждой ячейки отражает состояния этой ячейки и ее окружения не только в предыдущие, но и в более ранние моменты времени [11], например

$$s_i^{t+\Delta t} = f(s_{i-1}^{t-\Delta t}, s_i^{t-\Delta t}, s_{i+1}^{t-\Delta t}, s_{i-1}^t, s_i^t, s_{i+1}^t). \quad (4)$$

Модель нечеткой клеточной комбинационной схемы

Модель НКС применяется в тех случаях, когда предметная область описывается

экспертом лингвистическими (словесными) правилами или, когда трудно разработать достаточно простую математическую модель предметной области и необходима высокая гибкость в настройках системы управления; когда требуется расширить область значений входных параметров «четкой» комбинационной схемы без введения дополнительных правил и др. Отметим также, что нечеткий клеточный автомат без памяти или нечеткая комбинационная схема являются разновидностью непрерывного клеточного автомата [13].

Покажем на примере, как может быть построен нечеткий клеточный автомат. Состояние каждой ячейки описывается с помощью лингвистической переменной γ , принимающей ряд значений, например, $\gamma_a = \text{«низкое»}$, $\gamma_b = \text{«среднее»}$, ..., $\gamma_z = \text{«высокое»}$. Эти значения количественно задаются некоторыми нечеткими подмножествами G_a, G_b, \dots, G_z универсума S с помощью векторных функций $\mu_a(s), \mu_b(s), \dots, \mu_z(s)$ (где $s \in S$), определяющих степень принадлежности точек универсума S подмножествам G_a, G_b, \dots, G_z . Универсальное множество (универсум) состояний S ячейки НКС определим как $S = \{0, 1, \dots, S_{\max}\}$.

Вычисления будем производить в матричном виде [19, 20] и для этого введем компоненты функций принадлежности $\mu_a(s) = (\mu_{a0}, \mu_{a1}), \mu_b(s) = (\mu_{b0}, \mu_{b1}), \dots$. Истинностные компоненты этих векторов $\mu_{a1}, \mu_{b1}, \dots$ совпадают с функциями принадлежности, введенными Заде [21], а «ложные» – определяются равенствами $\mu_{a0} = 1 - \mu_{a1}, \mu_{b0} = 1 - \mu_{b1}, \dots$. Как показано в [20], переход к векторному описанию нечетких переменных позволяет ввести операции над ними, наиболее естественно обобщающие операции четкой логики, а также ввести непротиворечивую меру нечеткости, используя известную формулу Шеннона.

Алгоритм работы НКС формулируется на языке лингвистических переменных γ :

$$\gamma_i^{t+\Delta t} = \Gamma(\gamma_{i-1}^t, \gamma_i^t, \gamma_{i+1}^t), \quad (5)$$

где аргументы $\gamma_{i-1}^t, \gamma_i^t, \gamma_{i+1}^t$ функции Γ описывают соответственно состояния соседних ячеек с номерами $i-1, i, i+1$ в момент времени t , $\gamma_i^{t+\Delta t}$ – это состояние ячейки с

номером i в последующий момент времени $t + \Delta t$ (в формуле (5) для простоты считается, что размер r окрестности O равен единице). Функция Γ задается логическими правилами следующего вида «Если текущие состояния ячеек $\gamma_{i-1}^t = \text{«низкое»}$, $\gamma_i^t = \text{«низкое»}$ и $\gamma_{i+1}^t = \text{«низкое»}$, то новое состояние ячейки $\gamma_i^{t+\Delta t} = \gamma_0$ («низкое») и т. п.

Правила (5) могут быть записаны в явном виде с помощью логических операций конъюнкции, дизъюнкции и импликации следующим образом:

$$\sum_{k,l,m} \varepsilon_{k,l,m,n} (\gamma_{k,i-1}^t \wedge \gamma_{l,i}^t \wedge \gamma_{m,i+1}^t) \rightarrow \gamma_{n,i}^{t+\Delta t}, \quad (6)$$

где индексы k, l, m, n определяют конкретные значения лингвистических переменных γ , например, $\gamma_{a,i}^{t+\Delta t} = \text{«низкое»}$, $\gamma_{b,i}^{t+\Delta t} = \text{«среднее»}$, а $\gamma_{z,i}^{t+\Delta t} = \text{«высокое»}$ и т. п. В выражении (6) введена матрица $\varepsilon_{k,l,m,n}$, компоненты которой, в зависимости от значений индексов k, l, m, n , равны нулю или единице. Тем самым задаются правила работы «если ..., то...» рассматриваемой НКС (см. подробнее [19–20]). Символами \wedge, \rightarrow обозначены нечеткие логические операции конъюнкции и импликации соответственно, которые в окончательном результате сводятся к матричным операциям над значениями функций принадлежности $\mu_a(s)$, $\mu_b(s)$, ..., $\mu_z(s)$.

Численная реализация работы НКС на основе правил (6) строится следующим образом. В текущий момент времени t считаются известными параметры s_i^t – текущие состояния каждой ячейки. Цель расчета – найти параметры $s_i^{t+\Delta t}$ на следующем шаге по времени с помощью нечетких правил (6).

На первом этапе решения этой задачи проведем фазификацию заданных переменных, вычисляя значения функций $\mu_a(s)$, $\mu_b(s)$, ..., $\mu_z(s)$ при $s = s_i^t$. Полученные численные значения подставим в (6) вместо соответствующих значений лингвистических переменных γ :

$$F(s) = \sum_{k,l,m,n} \varepsilon_{k,l,m,n} [\mu_k(s_{i-1}^t) \wedge \mu_l(s_i^t) \wedge \mu_m(s_{i+1}^t) \rightarrow \mu_n(s)], \quad (7)$$

где введена вспомогательная векторная функция $F(s)$, позволяющая определить

новое состояние ячейки $s_i^{t+\Delta t}$.

Для реализации логических операций в формуле (7) используем матричный метод. Логические операции над векторными переменными описаны в [19, 20]: $x \wedge y = C(x) \cdot y$, $x \rightarrow y = I(x) \cdot y$, где $C(x)$ и $I(x)$ – известные 2×2 матрицы, а точка « \cdot » обозначает матричное умножение квадратной матрицы на матричный столбец, составленный из компонент вектора y .

Требуемый для решения задачи расчет четкого значения результата $s_i^{t+\Delta t}$ (дефазификация) может быть реализован с помощью найденной функции $F(s)$ «центроидным» методом:

$$\bar{s} = \frac{\int_{all S} s F_1(s) ds}{\int_{all S} F_1(s) ds}, \quad (8)$$

где $F_1(s)$ – истинностная компонента векторной функции $F(s)$. Полученный результат вычислений \bar{s} мы отождествляем со значением нового состояния ячейки, в которое она переходит:

$$s_i^{t+\Delta t} = \bar{s}. \quad (9)$$

Далее этот расчет повторяется для всех ячеек массива.

Моделирование поля температуры

Применим описанный метод для расчета поля температуры образца при заданных начальных условиях. При разработке алгоритма тепловая задача решалась для теплоизолированного образца (при отсутствии теплового потока на границах области). Подобные требования предъявляются на производстве, где в установке имеется несколько точечных источников тепла, а цель управления ими состоит в том, чтобы сформировать заданный профиль распределения температуры во всем объеме установки [22].

Для обеспечения возможности визуализации результатов ограничимся двумерной задачей, однако все дальнейшие выводы могут быть произведены и для трехмерной задачи.

Разобьем всю плоскость образца на отдельные ячейки. Количество ячеек выбира-



ется в зависимости от требований к пространственной детализации решения. Для рассмотренного ниже численного примера выбрано поле размером 25×25 ячеек.

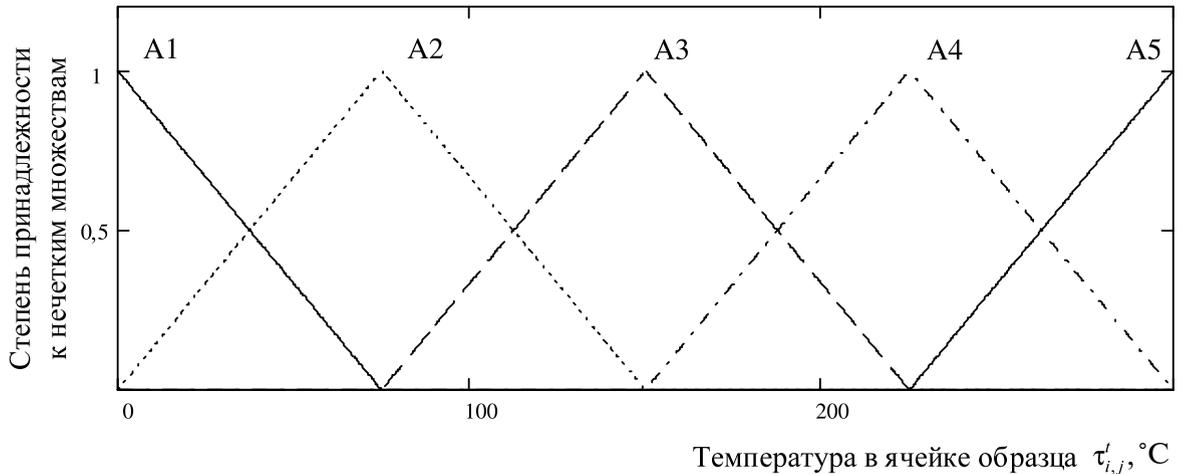
Введем параметры задачи и области их определения (универсальные множества):

T – температура образца, $T \in [0, 300]$ °С:

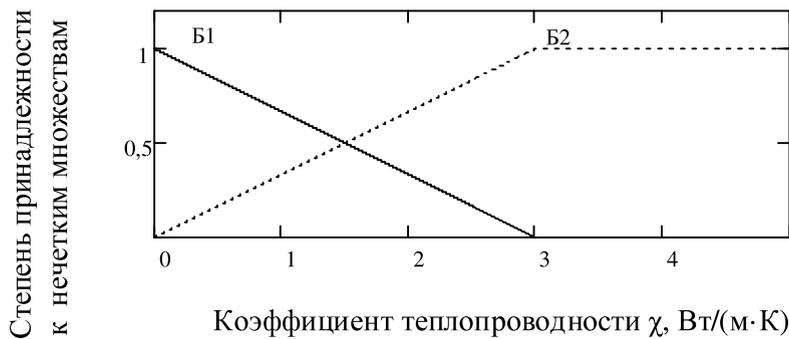
$\tau_{i,j}^t$ – температура i, j -го элемента образца (ячейки) в момент времени t ;

χ – коэффициент теплопроводности образца, $\chi \in [0, 400] \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$ (необходимость введения этого универсума и соответствующих лингвистических переменных

а)



б)



в)

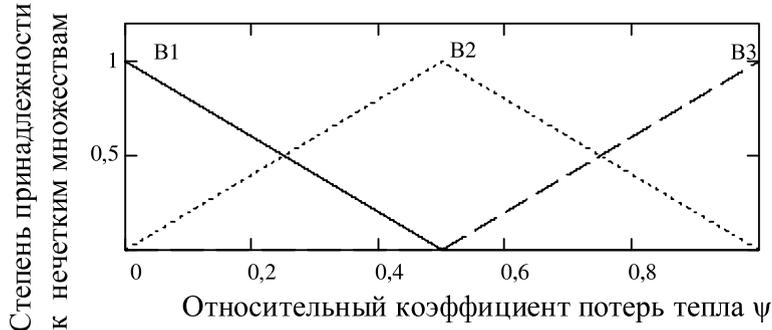


Рис.1. Графики функций принадлежности элементов универсальных множеств подмножеств, описывающим термы лингвистических переменных:

a – температура ячейки; b – величина коэффициента теплопроводности; v – величина коэффициента потерь тепла, где A1. «очень низкая», A2. «низкая», A3. «средняя», A4. «высокая», A5. «очень высокая», B1. «низкий», B2. «высокий», B1. «низкий», B2. «средний», B3. «высокий»

обусловлена различием правил изменения температуры образца в зависимости от теплопроводности материала);

ψ – относительный коэффициент потерь тепла в третьем измерении (по нормали к плоскости образца) за один шаг по времени Δt в одной ячейке, $\psi \in [0, 1]$. Величина ψ считается равной нулю, если этими потерями можно пренебречь.

Для алгоритмического описания процессов, происходящих в ячейке, введем следующие лингвистические переменные:

α – температура ячейки, принимающая значения: α_a – «очень низкая», α_b – «низкая», α_c – «средняя», α_d – «высокая», α_e – «очень высокая»;

β – величина коэффициента теплопроводности принимающая значения: β_a – «низкий», β_b – «высокий»;

γ – величина коэффициента потерь тепла, принимающая значения: γ_a – «низкий», γ_b – «средний», γ_c – «высокий».

Все термины лингвистических переменных количественно описываются нечеткими подмножествами введенных универсальных множеств. В свою очередь нечеткие подмножества задаются векторными функциями принадлежности $\mu_\alpha(\tau_{i,j}^t)$, $\mu_\beta(\chi)$, $\mu_\gamma(\psi)$. Возможный вариант зависимости истинностных частей этих функций от их аргументов приведен на рис. 1.

Эксперт формулирует правила передачи тепла между ячейками в виде:

«Если в данный момент времени температура ячейки с номерами $i - 1$, $j - 1$ $\alpha_{i-1,j-1}^t = \alpha_e$ («очень высокая»), и температура в ячейке с номерами $i - 1$, j $\alpha_{i-1,j}^t = \alpha_e$ («очень высокая»), и т. д., и коэффициент потерь тепла $\gamma = \gamma_a$ («низкий»), и коэффициент теплопроводности $\beta = \beta_c$ («высокий»), то температура в центральной ячейке (i, j) окружности на следующем шаге будет $\alpha_{i,j}^{t+\Delta t} = \alpha_e$ («очень высокая»). Зависимость между лингвистическими переменными условно выглядит следующим образом:

$$a_{k,i,j}^{t+\Delta t} = \Gamma(a_{1,i-1,j-1}^t, a_{2,i-1,j}^t, a_{3,i-1,j+1}^t, a_{4,i,j-1}^t, a_{5,i,j}^t, a_{6,i,j+1}^t, a_{7,i+1,j-1}^t, a_{8,i+1,j}^t, a_{9,i+1,j+1}^t, \beta_m, \gamma_n). \quad (10)$$

В правилах и формуле (10) анализируется температура в ячейках окрестности Мура

первого порядка.

С целью упрощения и унификации дальнейшего алгоритма в данной задаче можно применить дополнительное преобразование. Без внешних воздействий температура во всей системе стремится к равновесному значению. Поэтому, вместо того, чтобы анализировать температуру в каждой ячейке отдельно, можно найти среднюю температуру по окрестности O ячейки и анализировать ее. Перепишем (10) с учетом того, что $\alpha_{l,i,j}^t$ теперь характеризует среднюю температуру окрестности:

$$a_{k,i,j}^{t+\Delta t} = \Gamma(a_{l,i,j}^t, \beta_m, \gamma_n). \quad (11)$$

В таком виде можно без изменения дальнейшего алгоритма использовать различные формы и размеры окрестностей.

С помощью логических операций правила записываются в следующем виде:

$$\sum_{l,m,n} \varepsilon_{k,l,m,n} (a_{l,i,j}^t \wedge \beta_m \wedge \gamma_n) \rightarrow a_{k,i,j}^{t+\Delta t}, \quad (12)$$

где $\varepsilon_{k,l,m,n}$ – матрица выходов НКС.

Запишем все правила в виде таблицы (табл. 1).

Численная реализация алгоритма строится следующим образом. Считаются известные значения температуры в каждой ячейке $\tau_{i,j}^t$, а также коэффициент теплопе-

Таблица 1

Таблица выходов нечеткой клеточной комбинационной схемы «тепловое поле» на языке лингвистических переменных

	l	m	n	k
1	a	b	a	a
2	b	b	b	a
3	c	b	c	a
4	b	b	a	b
5	c	b	b	b
6	d	b	c	b
7	c	b	a	c
8	d	b	b	c
9	e	b	c	c
10	d	b	a	d
11	e	b	b	d
12	e	b	a	e



редачи χ и коэффициент потерь тепла ψ . Необходимо рассчитать значение температуры $\tau_{i,j}^{t+\Delta t}$ в ячейке i, j в момент времени $t + \Delta t$.

Находим среднее значение температур по окрестности O исследуемой ячейки:

$$\overline{\tau}_{i,j}^t = \frac{\sum_{x,y \in O} \tau_{i+x,j+y}^t}{N}, \quad (13)$$

где N – количество ячеек внутри окрестности O .

На этапе фазификации находим значения векторных функций принадлежности $\mu_\alpha(\tau_{i,j}^t)$, $\mu_\beta(\chi)$, $\mu_\gamma(\psi)$ в соответствии с рис. 1.

На основе правила (12) составляем вспомогательную векторную функцию [19, 20]:

$$F^{(i,j)}(\tau) = \underset{k,l,m,n}{D} \varepsilon_{k,l,m,n} C[C\{\mu_{\alpha l}(\overline{\tau}_{i,j}^t)\} \times \mu_{\beta m}(\chi)] \mu_{\gamma n}(\psi) \mu_{\alpha k}(\tau), \quad (14)$$

где запись $\underset{k,l,m,n}{D}$ означает дизъюнкцию нечетких векторов по всем индексам k, l, m, n . Напомним, что согласно своему определению [20] матричная модель дизъюнкции обладает свойством коммутативности.

Расчет четких значений осуществляется центроидным методом:

$$\tilde{\tau}_{i,j} = \frac{\int \tau F_1^{(i,j)}(\tau) d\tau}{\int F_1^{(i,j)}(\tau) d\tau}. \quad (15)$$

Полученное число мы отождествим со значением температуры в ячейке с номерами i, j в момент времени $t + \Delta t$:

$$\tau_{i,j}^{t+\Delta t} = \tilde{\tau}_{i,j}. \quad (16)$$

Результат работы алгоритма для произвольного начального расположения источников тепла представлен на рис. 2.

Также система позволяет проводить анализ температурных волн, в частности,

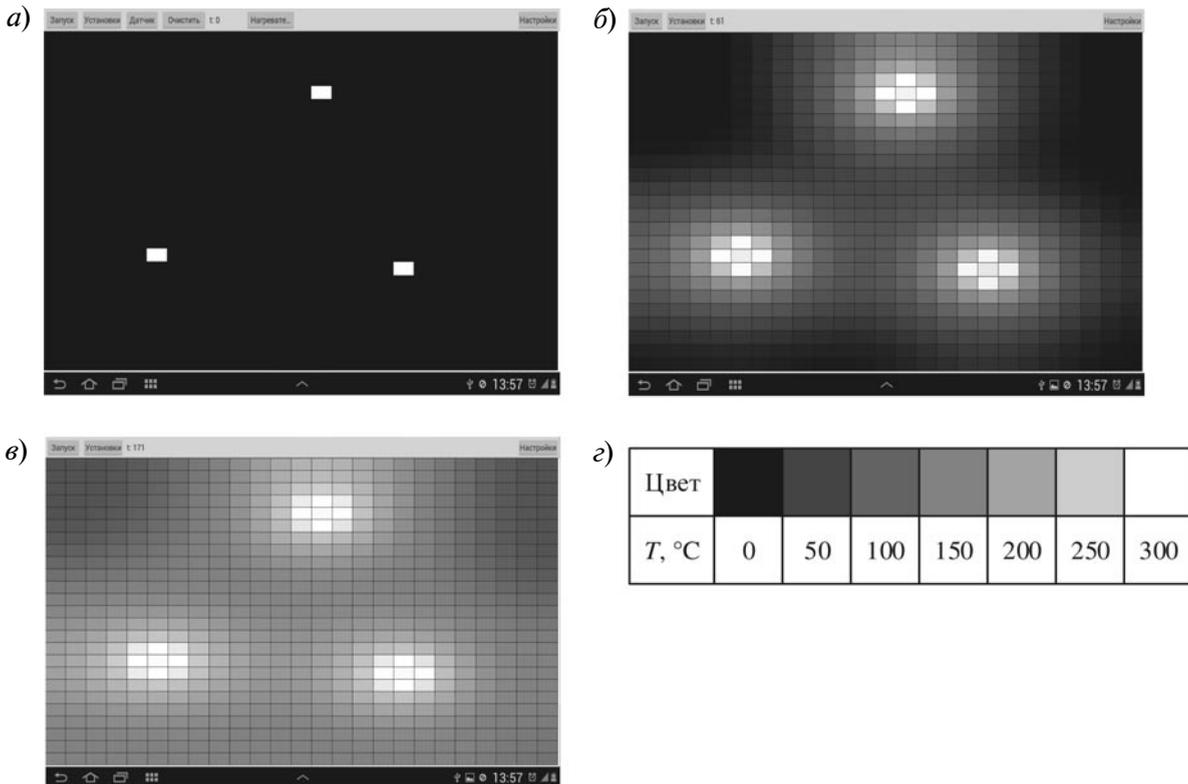


Рис. 2. Результат расчета нечеткой клеточной комбинационной схемой поля температуры образца в случае произвольного расположения источников тепла в моменты времени:

$a - t = 0$; $b - t = 61\Delta t$; $c - t = 171\Delta t$; $г$ – таблица соответствия цветов на рисунках температурам ячеек

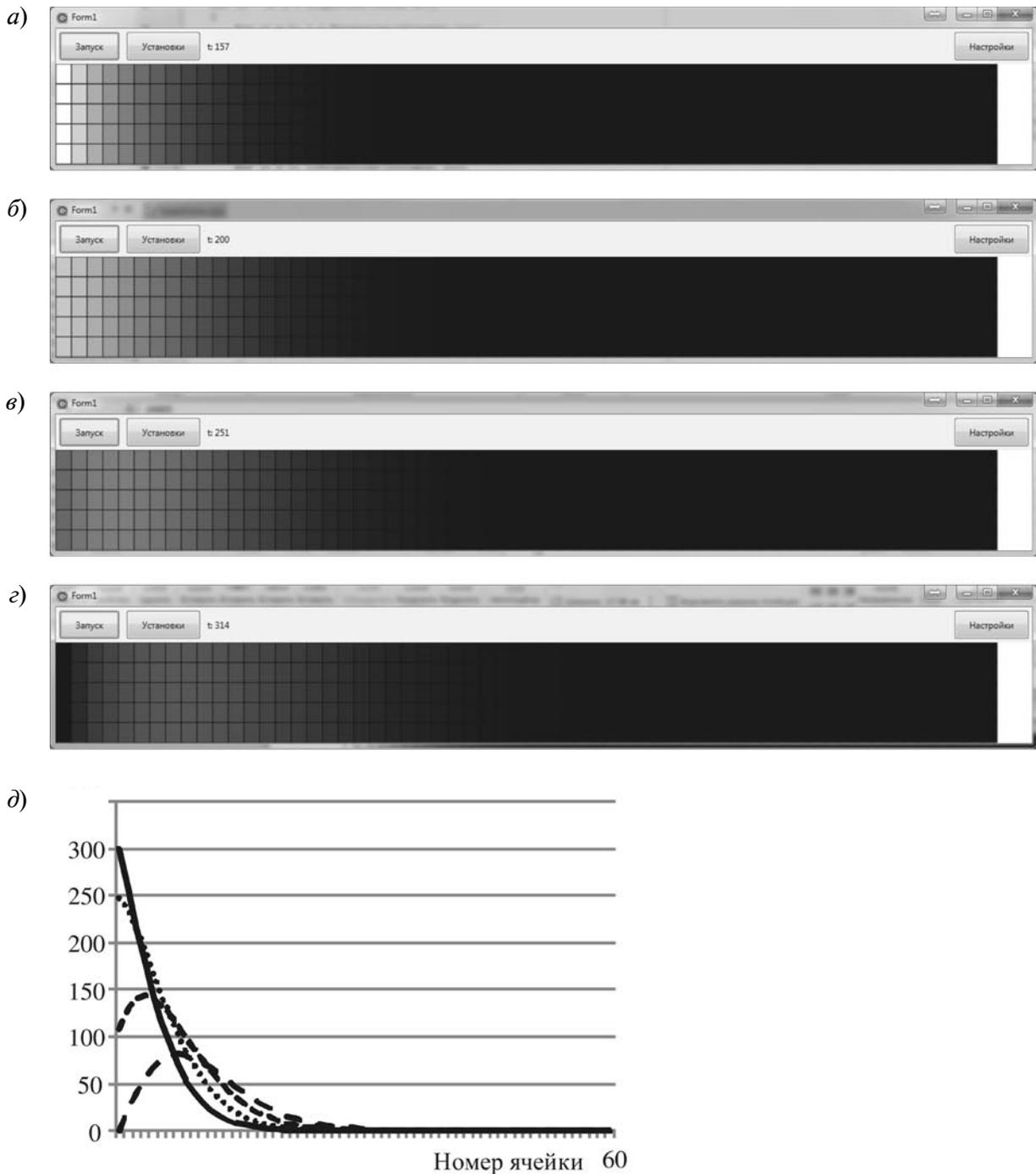


Рис. 3. Результаты расчетов поля температуры в квазилинейном образце при гармоническом граничном условии (18) в моменты времени:
 $a - t = 157\Delta t$; $б - t = 200\Delta t$; $в - t = 250\Delta t$; $г - t = 314$; $д$ – поперечные профили температурной волны в соответствующие моменты времени
 (—) $t = 157$; (.....) $t = 200$; (----) $t = 250$; (- -) $t = 314$

их дисперсии. Произведем расчет изменения температурного поля в квазилинейном образце при гармоническом граничном

условии (рис. 3):

$$\tau_{i,0}^t = \tau_{\max} (0,5 - 0,5 \cos(0,02t)). \quad (17)$$

Модель нечеткого клеточного автомата

Классические модели клеточных автоматов (см., например, [2, 8, 9]) подразумевают под собой функционал клеточных комбинационных схем. Фактически хранится и используется только текущее значение исследуемой величины в каждой клетке. При этом история изменения значений в клетках никак не анализируется.

В работе [11] предложена модель «четкого» клеточного автомата с памятью, в которой для каждой ячейки кроме значения основной исследуемой величины хранится «состояние», отражающее историю изменения исследуемой величины.

С нашей точки зрения полезной также является модель нечеткого клеточного автомата с памятью (НКАП). По аналогии с «четкими» клеточными автоматами НКАП состоит из массива клеток, содержащих информацию о текущем значении исследуемой величины и истории ее изменения, а также вычислительное устройство (логический автомат), определяющее переходы клеток между состояниями. Вычислительное устройство представляет собой нечеткий автомат.

Как показано в [14], в случае конечной памяти нечеткий автомат можно эквивалентно заменить модифицированной нечеткой комбинационной схемой (МНКС) без потери функциональности. Причем в такой модели не требуется описывать «состояния» ячеек и достаточно хранить историю изменения исследуемой величины в виде массива-очереди.

Рассмотрим построение такого автомата на конкретном примере. Недавние исследования [16–18] показывают, что уравнение теплопроводности в общем случае содержит слагаемое, зависящее от температуры среды в предшествующие моменты времени. Иными словами, среда обладает температурной памятью:

$$q(x, t) = -\chi \nabla T(x, t) - \xi \nabla \hat{T}(x, t), \quad (18)$$

где $\hat{T}(x, t)$ – так называемое температурное смещение

$$\hat{T}(x, t) = \hat{T}(x, 0) + \int_0^t T(x, s) ds. \quad (19)$$

Предположим, что в данный момент уже рассчитано предварительное значение температуры в ячейке i, j (часть с коэффициентом χ) по описанному выше (14)–(16) алгоритму. Определим вклад памяти ξ . Для этого найдем среднее за определенное количество шагов по времени значение температуры в ячейке:

$$\bar{\tau}_{i,j}^t = \frac{\sum_{s=0}^{L-1} \bar{\tau}_{i,j}^{t-s\Delta t}}{L}, \quad (20)$$

где $\bar{\tau}_{i,j}^{(t-s\Delta t)}$ – температура в соответствующей ячейке в момент времени $t - s\Delta t$; L – глубина памяти.

Введем лингвистические переменные:

α – температура в ячейке, принимающая значения α_a – «очень низкая», α_b – «низкая», α_c – «средняя», α_d – «высокая», α_e – «очень высокая»;

η – величина коэффициента влияния памяти вещества, принимающая значения η_a – «низкая», η_b – «высокая».

Графики истинностных частей векторных функций принадлежности $\mu_\alpha(\bar{\tau}_{i,j}^t)$ и $\mu_\eta(\xi)$ приведены на рис. 1 а и на рис. 4.

Задаем лингвистические правила в следующем виде: «Если разница средней по времени температуры и текущей температуры α_e «очень высокая» и влияние памяти η_b «высокое», тогда необходимо изменить текущую температуру на величину α_e с учетом знака».

С помощью логических операций правила записываются в следующем виде:

$$\sum_{l,m} e_{k,l,m} a_{l,i,j}^t \wedge \eta_m \rightarrow a_{k,i,j}^{t+\Delta t}. \quad (21)$$

Перечислим все правила в виде таблицы (табл. 2).

Для численного расчета строим вспомогательную векторную функцию:

$$G^{(i,j)}(\tau) = \prod_{k,l,m} e_{k,l,m} C[C\{\mu_{al}(\bar{\tau}_{i,j}^t)\} \times \mu_{\eta m}(\xi)] \mu_{ak}(\tau). \quad (22)$$

Четкое значение добавочного вклада памяти в температуру ячейки с номерами i, j находится центроидным методом:

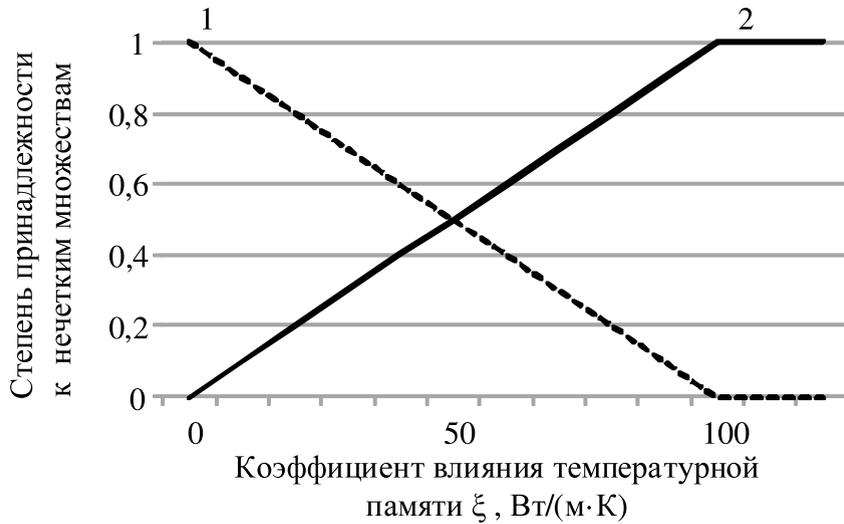


Рис. 4. Графики истинностных компонент векторных функций принадлежности значений коэффициента влияния памяти нечетким подмножествам, описывающим термы 1 – η_a «низкая» и 2 – η_b «высокая» лингвистической переменной «Величина коэффициента влияния памяти вещества»

$$\tilde{\tau}_{i,j}^{l+1} = \frac{\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \tau G_1^{(i,j)}(\tau) d\tau}{\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} G_1^{(i,j)}(\tau) d\tau}. \quad (23)$$

Вкладом памяти в модели можно управлять двумя способами:

- Изменять глубину памяти L . В случае моделирования только по уравнению Фурье $L = 1$.

Таблица 2

Таблица выходов нечеткой модифицированной клеточной комбинационной схемы «тепловое поле» на языке лингвистических переменных

	l	m	k
1	a	a	a
2	a	b	a
3	b	a	a
4	b	b	b
5	c	a	b
6	c	b	c
7	d	a	b
8	d	b	d
9	e	a	c
10	e	b	e

- Изменять коэффициент влияния памяти ξ .

Построим для сравнения профили волны в квазилинейной среде с гармоническим граничным условием (17) при $L = 1$, $L = 2$, $L = 5$ и $\xi = 100$ (рис. 5).

Из рисунка видно, что наличие памяти делает систему более инерционной.

Использование классических численных методов для расчета полей физических величин, например, метода конечных элементов, делает весьма трудоемким анализ истории изменения величины, в то время как данный метод позволяет без особых затрат на доработку учитывать память и, более того, регулировать ее глубину.

Таким образом, применяя модель нечеткого клеточного автомата, мы получаем возможность проследить за изменением температурного поля, что можно использовать для решения задачи управления, как это описано, например, в работе [22]. Предположим, что поставлена задача прецизионного выравнивания поля температуры. На первом шаге, запуская автомат для разных начальных распределений, идентифицируем параметры задачи (см. подробнее [22]). Далее, в каждый текущий момент времени находим амплитуды собственных гармоник

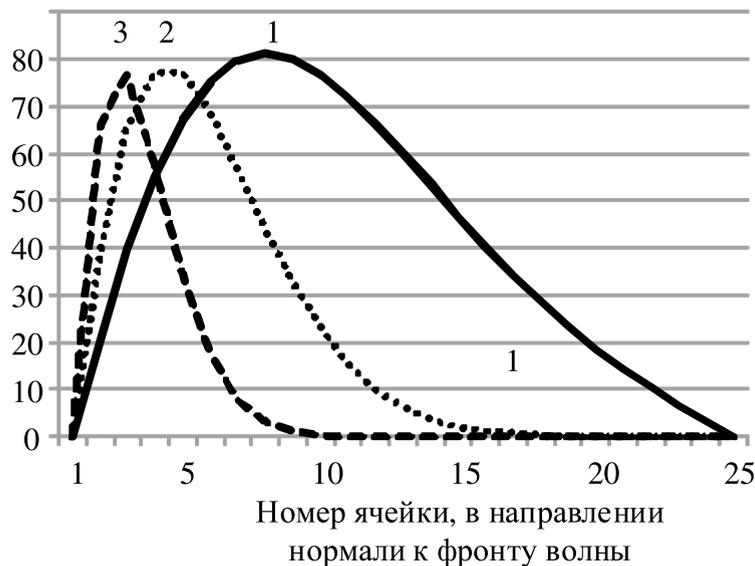


Рис. 5. Профили температурной волны в квазилинейном образце с гармоническим граничным условием (17) с параметрами: 1 — $L = 1$; 2 — $L = 2$; 3 — $L = 5$; $\xi = 100$ в момент времени $t = 314 \cdot \Delta t$

тепловой задачи и вычисляем мощности нагревателей, которые обеспечивают выравнивание температуры с необходимой точностью и скоростью. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность указанного метода управления, а использование нечеткого алгоритма управления клеточным автоматом дает возможность не только следить за работой системы управления, но и подбирать оптимальный объект управления.

Показано, что задачу расчета поля температуры в динамических условиях можно решить с помощью нечетких клеточных автоматов без памяти или нечетких комбинационных схем.

Учет эффекта температурной памяти, предлагаемый как уточнение в современной литературе, можно осуществить с помощью нечетких клеточных автоматов с памятью или нечетких клеточных модифицированных комбинационных схем.

Принципиальное отличие развиваемо-

го подхода от представленных в литературе (см., например, [16–18]) состоит в том, что здесь не используется численная схема для решения интегро-дифференциального уравнения, к которому сводится эта задача при ее описании в указанных источниках. Предлагаемая модель обладает большой гибкостью, т. к. у разработчика имеется возможность увеличивать или уменьшать глубину памяти, изменять как функции принадлежности, которыми описываются значения лингвистических переменных, так и логические формулы, по которым задается работа автомата.

Расчет поля температуры позволяет повысить эффективность решения задачи управления этим полем.

Для реализации алгоритмов нечетких клеточных автоматов удобно использовать матричный подход нечеткой логики, позволяющий сократить аппаратные требования решения, что, в свою очередь, позволяет реализовать задачу даже на базе мобильных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. фон Нейман Д. Теория самовоспроизводящихся автоматов. Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 384 с.
2. Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины кле-

точных автоматов. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 280 с.

3. Беланков А.Б., Столбов В.Ю. Моделирование процесса формирования микроструктуры

при кристаллизации металлов с помощью клеточных автоматов // Математическое моделирование систем и процессов. 2002. № 10. С. 6–16.

4. **Ahmed E.** Fuzzy Cellular Automata Models in Immunology // *J. of Statistical Physics*. 1996. Vol. 85. Pp. 291–294.

5. **Zamani S., Javanmard M., Jafarzadeh N., Zamani M.** A Novel Image Encryption Scheme Based on Hyper Chaotic Systems and Fuzzy Cellular Automata // *The 22nd Iranian Conf. on Electrical Engineering*. 2014.

6. **Rosin P., Adamatzky A., Sun X.** Cellular Automata in Image Processing and Geometry // *Emergence, Complexity and Computation*. Springer, 2014. Vol. 10. P. 304.

7. **Sridharan R., Pudi V.** Design of Arithmetic Circuits in Quantum Dot Cellular Automata Nanotechnology. Springer, 2015. P. 99.

8. **Mantelas L., Prastacos P., Hatzichristos T., Koutsopoulos K.** Using fuzzy cellular automata to access and simulate urban growth // *Geo Journal*. Springer, 2012. Pp. 13–28.

9. **Mainzer K., Chua L.** The Universe as Automaton: From Simplicity and Symmetry to Complexity. Springer, 2012. P. 108.

10. **Hoekstra A.G., Kroc J., Sloot P.M.A.** Simulating Complex Systems by Cellular Automata. Springer, 2010. P. 393.

11. **Salcido A.** Cellular Automata – Innovative Modelling for Science and Engineering // *InTech*. 2011. P. 440.

12. **Alonso-Sanz R., Martin M.** Cellular Automata with Memory. Materials of Wolfram Science Conference 2006 [Электронный ресурс]/ URL: <https://www.wolframscience.com/conference/2006/presentations/materials/alonsosanz.pdf> (Дата обращения 09.02.2015).

13. **Cattaneo G., Flocchini P., Mauri G., Vogliotti C.Q., Santoro N.** Cellular automata in fuzzy backgrounds // *Physica D*. 1997. Vol. 105. Pp. 105–120.

14. **Betel H., Flocchini P.** On the Relationship

between Fuzzy and Boolean Cellular Automata // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. 2009. Vol. 252. Pp. 5–21.

15. **Марценюк М.А., Селетков И.П.** Приведение конечного нечеткого автомата к нечеткой комбинационной схеме с блоком памяти // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 6 (210). С. 67–80.

16. **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.

17. **Green A.E., Naghdi P.M.** A re-examination of the basic postulates of thermomechanics // *Proc. Roy. Soc. London Ser. A* 432. 1991. Pp.171–194.

18. **Giorgi C., Grandi D., Pata V.** On the Green-Naghdi Type III Heat Conduction Model // *Mathematics Subject Classification*. 2000.

19. **Ковалев В.А., Радаев Ю.Н., Семенов Д.А.** Связанные динамические задачи гиперболической термоупругости // *Изв. Саратов. ун-та. Математика. Механика. Информатика*. 2009. Т. 9. Вып. 4(2). С. 94–127.

20. **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.

21. **Марценюк М.А.** Матричное представление нечеткой логики // *Нечеткие системы и мягкие вычисления*. 2007. Т. 2. № 3. С. 7–35.

22. **Zadeh L.A.** Fuzzy Sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.

23. **Марценюк М.А., Ощепков А.Ю., Яценко А.В.** Синтез адаптивного управления температурными полями распределенных объектов. Теория и эксперимент // *Вестник Пермского университета. Физика*. Пермь.: Изд-во Перм. ун-та, 1995. Вып. 3. С. 11–43.

REFERENCES

1. **fon Neyman D.** *Teoriya samovosproizvodyashchikhsya avtomatov [Theory of Self-reproducing Automata]*. Moscow: Mir Publ., 1971, 384 p. (rus)

2. **Toffoli T., Margolus N.** *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*. The MIT Press, 1987, P. 200.

3. **Belankov A.B., Stolbov V.Yu.** Modelirovanie processa formirovaniya mikrostrukturi pri kristallizacii metallov s pomoshhyu kletochnix avtomatov [On the modelling of process of microstructure formation during the metal crystallization using cellular automata]. *Matematicheskoe modelirovanie*

system i processov [Mathematical modelling of systems and process], 2002, No. 10, Pp. 6–16. (rus)

4. **Ahmed E.** Fuzzy Cellular Automata Models in Immunology. *Journal of Statistical Physics*, 1996, Vol. 85, Pp. 291–294.

5. **Zamani S., Javanmard M., Jafarzadeh N., Zamani M.** A Novel Image Encryption Scheme Based on Hyper Chaotic Systems and Fuzzy Cellular Automata. *The 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2014.

6. **Rosin P., Adamatzky A., Sun X.** Cellular Automata in Image Processing and Geometry.

Emergence, Complexity and Computation. Springer, 2014, Vol. 10, P. 304.

7. **Sridharan R., Pudi V.** *Design of Arithmetic Circuits in Quantum Dot Cellular Automata Nanotechnology*. Springer, 2015, P. 99.

8. **Mantelas L., Prastacos P., Hatzichristos T., Koutsopoulos K.** Using fuzzy cellular automata to access and simulate urban growth, *Geo Journal*. Springer, 2012, Pp. 13–28.

9. **Mainzer K., Chua L.** *The Universe as Automaton: From Simplicity and Symmetry to Complexity*. Springer, 2012, P. 108.

10. **Hoekstra A.G., Kroc J., Sloot P.M.A.** *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*. Springer, 2010, P. 393.

11. **Salcido A.** Cellular Automata – Innovative Modelling for Science and Engineering, *InTech*, 2011, P. 440.

12. **Alonso-Sanz R., Martín M.** *Cellular Automata with Memory. Materials of Wolfram Science Conference 2006*. Available: <https://www.wolframscience.com/conference/2006/presentations/materials/alonsosanz.pdf> (Accessed 09.02.2015).

13. **Cattaneo G., Flocchini P., Mauri G., Vogliotti C.Q., Santoro N.** Cellular automata in fuzzy backgrounds. *Physica D*, 1997, Vol. 105, Pp. 105–120.

14. **Betel H., Flocchini P.** On the Relationship between Fuzzy and Boolean Cellular Automata. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2009, Vol. 252, Pp. 5–21.

15. **Martsenyuk M.A., Seletkov I.P.** Privedenie konechnogo nechetkogo avtomata k nechetkoi kombinacionnoi sheme s blokom pamyati [Conversion of Fuzzy Finite Automata to Fuzzy Combinational Circuit]. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control System]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 6(210), Pp. 67–80. (rus)

16. **Martsenyuk M.A.** Operatorno-logicheskie shemi kak sredstvo isucheniya algoritmov v ychebnykh

kursakh po matematike i informatike [Operator-logic schemes as a means of studying algorithms in training courses in mathematics and computer science]. *Prikladnaya informatika [Science journal of applied informatics]*, 2010, No. 5 (23), Pp. 43–54. (rus)

17. **Green A.E., Naghdi P.M.** A re-examination of the basic postulates of thermomechanics, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A* 432. 1991, Pp. 171–194.

18. **Giorgi C, Grandi D., Pata V.** On the Green-Naghdi Type III Heat Conduction Model. *Mathematics Subject Classification*, 2000.

19. **Kovalev V.A., Radaev Yu.N., Semenov D.A.** Svyazannye dinamicheskie zadachi giperbolicheskoi termouprugosti [Coupled Dynamic Problems of Hyperbolic Thermoelasticity], *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Matematika. Mehanika. Informatika [News of Saratov State University. Mathematics. Mechanics. Informatics]*, 2009, Vol. 9, No. 4(2), Pp. 94–127. (rus)

20. **Martsenyuk M.A., Polyakov V.B., Seletkov I.P.** Matrichnoe predstavlenie algorimov nechetkogo vivoda [Matrix Implementation of Fuzzy Inference Algorithms]. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikacii. 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)

21. **Martsenyuk M.A.** Matrichnoe predstavlenie nechetkoi logiki [Matrix Representation of Fuzzy Logic], *Nechetkie sistemi i myagkie vychisleniya [Fuzzy Systems and Soft Computing]*, 2007, Vol. 2, No. 3, Pp. 7–35. (rus)

22. **Zadeh L.A.** Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, Vol. 8, Pp. 338–353.

23. **Martsenyuk M.A., Oshhepkov A.Yu., Yacenko A.V.** Sintez adaptivnogo upravleniya temperaturnymi polyami raspredelennykh ob'ektov. Teoriya i experiment [Synthesis of adaptive control temperature fields of distributed objects. Theory and experiment], *Vestnik Permskogo Universiteta [Newsletter of Perm State University]*. Perm: Perm State University Publ., 1995, Vol. 3, Pp. 11–43. (rus)

МАРЦЕНИЮК 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



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.12

УДК 656, 004.8

*С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов***О ПОСТРОЕНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ
И РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МЕГАПОЛИСА***S.A. Seliverstov, Ya.A. Seliverstov***CONSTRUCTION OF INTELLIGENT SYSTEM FOR THE ORGANIZATION
AND DEVELOPMENT OF TRANSPORT SYSTEM METROPOLIS**

Обоснована актуальность разработки принципиально новой системы интеллектуальной пространственной организации и развития мегаполиса. Проведен анализ подходов развития современного мегаполиса с учетом развития его функциональной среды и транспортной системы. Исследованы вопросы взаимодействия землепользования, транспорта и городского развития. Проанализированы существующие архитектуры интеллектуальных транспортных систем. На логико-алгоритмическом языке осуществлена формальная разработка интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса. Для обеспечения структурной и функциональной однородности последней впервые разработан реляционный фильтр селективного анализа индикаторного комбинаторного расширения связей (РЕФИСАНИК). На логико-алгоритмическом языке представлено описание, процесс синтеза и функционирование основных блоков системы РЕФИСАНИК, включающей блок систему, селекционный фильтр, комбинаторный расширитель индикаторных связей и реляционный регулятор согласования. На практических примерах продемонстрирована работа системы и ее компонентов.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МЕГАПОЛИСА; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ УРБАНИЗАЦИЯ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА.

The article proves the necessity to develop a radically new system of an intellectual spatial organization and the development of metropolis. We have analyzed the approaches of the modern metropolis taking into account the development of its operational environment and transport system. We have investigated the issues regarding the cooperation of land-use, transport and urban development and analyzed the existing architectures of intelligent transport systems. To develop the intellectual system of the organization and development of the metropolis transport system, a logical-algorithmic language has been used. We have firstly developed a system of REFISANIK to ensure structural and functional homogeneity. Using a logic-algorithmic language we have described the process of synthesis and functioning of main units of the system of REFISANIK including a block system, a selective filter, a combinatorial extender of indicator links and relational regulatory approval. Practical examples demonstrate the operation of the system and its components.

INTELLIGENT SYSTEM FOR THE ORGANIZATION AND DEVELOPMENT OF TRANSPORT SYSTEM METROPOLIS; INTELLIGENT URBANIZATION; INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM.

Основу передовых тенденций развития транспортной системы (ТС) современного мегаполиса [1, 2] сегодня составляет ее всесторонняя интеллектуализация [3, 4]. Уже проработаны множество подходов созда-

ния и построения интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [5]. Основными [6] считаются Европейская рамочная архитектура ИТС, Американская национальная архитектура ИТС и Японская ИТС архи-

текстура. Функциональные сферы последних охватывают [7]: управление дорожным движением, управление общественным транспортом, управление транспортными средствами (ТрСр), электронный сбор платежей, управление чрезвычайными ситуациями на транспорте, грузовые и коммерческие перевозки, информационное обеспечение путешественников и кооперативные технологии.

В области интеллектуального планирования городов с определенной степенью эффективности проработаны интеллектуальные модели управлением городскими транспортными системами (ГТС) [4, 6, 7], модели управления землепользованием [8] и городской логистикой [9, 10].

Под влиянием факторов урбанизации и экономики землепользования [8] произошло смещение операционного ориентирования ГТС в сторону качества обслуживания пассажиров, экологических критериев городской среды и критериев транспортной доступности.

Между тем проблемы построения систем интеллектуального управления процессами урбанизации не исследовались не только российскими, но и европейскими научно-исследовательскими коллективами. Построение интеллектуальных систем управления мегаполисом, по нашему мнению, является определяющим в развитии «умного города» и открывает дорогу к построению принципиально новых систем управления неизмеримо большего класса сложности, чем ИТС.

Анализ предметной области. Представители академических, научных и инженерных кругов с различных точек зрения исследовали проблемы формирования и развития ГТС. Методологические принципы архитектурного построения ТС с фундаментальных позиций рассмотрены в [11], проблемы их развития в [12], а технология анализа в [13, 14]. При этом в [13] предложен метод анализа ГТС посредством ее мультипредставления структурой «черного ящика». В [14] разрешена проблема структурно-функциональной организации транспортных объектов в коммуникационных средах и транспортных сетях (ТрС).

Вопросы типологической классификации последних и их территориального роста с учетом географического положения приведены в [15]. Связь ТС и города с позиции жизнеобеспечения территории и эффективности социально-экономических процессов исследованы в [16], а проблемы функционального зонирования города, организации дорожного движения и проектирования улично-дорожных сетей – в [17]. Аспекты взаимодействия землепользования и транспорта в городских условиях, а также анализ публикаций в этой области исследованы в [18]. Более подробно современные методы и технологии городской инженерии рассмотрены в [10], а направления развития индексов городской устойчивости – в [19]. Рассматривая город и транспорт как единую динамическую систему, в [20] предложен качественный метод анализа устойчивой городской мобильности и определены общие факторы последней. Проблемы взаимодействия землепользования и транспортного планирования с учетом врожденного стремления человека к мобильности частично исследованы в [21].

Развитие информационных, телекоммуникационных и компьютерных технологий [22] позволило подойти к возможности построения интеллектуальных систем управления городскими транспортными процессами [23, 24] и их компонентов [25]. Среди последних работ в этой области отметим следующие. Методы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы рассмотрены в [26]. Проблема автоматической классификации и структурной упорядоченности социально-экономического поведения городского населения применительно к моделям управления ГТС с использованием агентного подхода впервые решается в [27]. В работе [28] построена структурная модель системы городского транспортно-логистического мониторинга с использованием технологий идентификации, аутентификации, местопредопределения и распознавания состояний подвижных и стационарных объектов. Проблемы внедрения подобных систем разрешаются на принципах, предложенных в [29, 30]. В статье [31] разработана модель

управления ГТП, устойчивая к неопределенности внешней информационной среды, и осуществлен переход от поведенческих принципов Вардропа к целевой функции управления процессами транспортной мобильности. Проблемы построения бесконфликтного непрерывного процесса в ГТС исследованы [32]. Интеллектуализация ГТС с позиции построения самоорганизации транспортно-логистического процесса осуществлена в [33].

Постановка проблемы. Анализ публикаций свидетельствует о проработке научных подходов в построении интеллектуальных ГТС и технологий их повсеместного внедрения. Однако до настоящего времени даже на концептуальном уровне не затрагивалась

задача интеллектуального управления процессом пространственного развития и организации ТС мегаполиса. Разработке данного метода и посвящена настоящая статья.

Архитектурная модель интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса (ИСОРТСМ). Изложение ИСОРТСМ уместно начать с формирования ее логико-алгебраической структуры Θ , включающей системы ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ – [U], МЕГАПОЛИС – [M], ТРАНСПОРТ – [T], ФУНКЦИОНАЛ УПРАВЛЕНИЯ – [Ф] и РЕЛЯЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР СОГЛАСОВАНИЯ – [Σ]. Графически ИСОРТСМ представлена на рис. 1, формально зададим ее следующим выражением:

$$\Theta \ni \left\{ \begin{array}{l} \left\langle \begin{array}{l} [U] \\ [M] \\ [T] \end{array} \right\rangle : \|[M] \ni ([T] \ni [U]) \\ [\Sigma] \cup_{[Ф]} \left(\left\langle EV^U \right\rangle \wedge \left\langle EV^M \right\rangle \wedge \left\langle EV^T \right\rangle \wedge \left\langle EV^Ф \right\rangle \right) \\ \left\langle EV^U \right\rangle \nabla (I_{[U]}); \left\langle EV^M \right\rangle \nabla (I_{[M]}); \left\langle EV^T \right\rangle \nabla (I_{[T]}); \left\langle EV^Ф \right\rangle \nabla (I_{[Ф]}) \\ \left\langle EV^Ф \right\rangle \nabla \left(\left\langle EV^U \right\rangle \wedge \left\langle EV^M \right\rangle \wedge \left\langle EV^T \right\rangle \right) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где [Ф] = (f_μ, f_r, f_p, f_k) – включает операторы: измерения – f_μ , регулирования – f_r , планирования – f_p и контроля – f_k ; $I_{[U]}$ – множество индикаторов развития системы пользователь; $I_{[M]}$ – множество индикаторов развития системы мегаполис; $I_{[T]}$ – множество индикаторов развития системы транспорт; $I_{[Ф]}$ – множество индикаторов развития функционала управления; EV^U – полюс развития системы пользователь; EV^M – полюс развития системы мегаполис; EV^T – полюс развития системы транспорт; $EV^Ф$ – полюс развития функционала управления.

Стрелки, исходящие из СРРС и пересекающие системы ИСОРТСМ [U], [M], [T], [Ф] в направлении соответствующих полюсов – $EV^U, EV^M, EV^T, EV^Ф$, означают рациональный непрерывный процесс развития элементов системы.

Перспективу развития при этом определяют интегральные индикаторные множества $I_{[U]}, I_{[M]}, I_{[T]}, I_{[Ф]}$ соответствующей пары СИСТЕМА→ПОЛЮС. Формально процесс развития ИСОРТСМ интерпретируется так:

$$\Theta \xrightarrow{[\Sigma][Ф]} EV \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U \xrightarrow{f[U]} EV^U \\ M \xrightarrow{f[M]} EV^M \\ T \xrightarrow{f[T]} EV^T \\ Ф \xrightarrow{f[Ф]} EV^Ф \end{array} \right.$$

Логико-алгебраическое описание внешней структуры ИСОРТСМ. Система пользователь (СП) является основной системой в структуре ИСОРТСМ. Под пользователем будем понимать любое физическое лицо, зарегистрированное под одним из статусов городской принадлежности (житель города, путешественник и др.). Функция СП – формирование и совершенствование

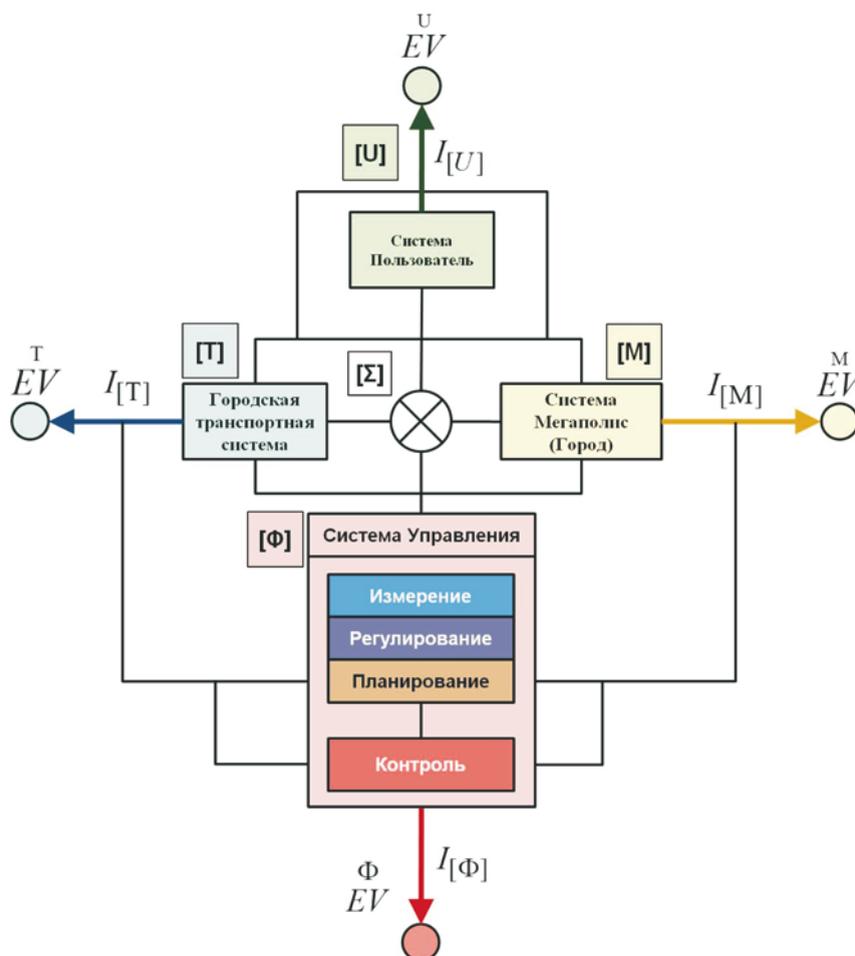


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса

индикаторов, характеризующих пользователя (характеристики жизнедеятельности, социально-экономические показатели, показатели качества жизни, показатели здоровья, психологические показатели, показатели комфорта и эргономики и др.). Индикаторное множество СП $I_{[U]}$ через СРРС оказывает влияние на процесс формирования и развития индикаторных характеристик СТ, СМ и СУ.

Система транспорт (СТ) – рационально организованная совокупность множества индикаторов, характеризующих объекты и субъекты транспортной инфраструктуры и ТрСр, функционирующих в пределах границ мегаполиса. Цель транспорта – удовлетворение потребностей пользователя качественными транспортными услугами.

Функция СТ – устойчивое поддержание

и развитие характеристик индикаторного множества СТ, обеспечивающее непрерывное эффективное функционирование ТП внутри мегаполиса.

Индикаторное множество СТ через РРС оказывает влияние на процесс формирования и развития индикаторных характеристик СП, СМ и СУ.

Система мегаполис (СМ) – рационально организованное индикаторное множество, характеризующее мегаполис в целом. Значением индикаторов СМ определяется уровень безопасности мегаполиса, эффективность функционирования его подсистем, степень развития и разнообразия его инфраструктуры. Функция СМ – устойчивое поддержание и развитие характеристик индикаторного множества СМ.

Индикаторное множество СМ через

PPC оказывает влияние на процесс формирования и развития индикаторных характеристик СП, СТ и СУ.

Система управления (СУ) в общем виде представлена операторами измерения текущего состояния объекта управления, планирования, регулирования и контроля. Цель СУ – совершенствование управляющих методов и воздействий для устойчивого обеспечения процессов функционирования ИСОРТСМ и удовлетворения потребностей пользователя. Функция СУ – устойчивое развитие характеристик индикаторного множества ИСОРТСМ в соответствии с заданным законом управления.

Реляционный регулятор согласования (PPC) – система, обеспечивающая рациональное развитие ИСОРТСМ. Цель PPC – рациональное совершенствование ИСОРТСМ. Функция PPC – поиск состояния устойчивого рационального максимума функционирования систем ИСОРТСМ, при котором достигается предельная скорость движения вдоль вектора развития СИСТЕМА–ПОЛЮС. Поиск и формирование согласованного индикаторного множества, обеспечивающего устойчивый рост индикаторных множеств ИСОРТСМ.

Таким образом, предлагаемая структурная схема ИСОРТСМ логически связывает процесс развития ТС и мегаполиса и позволяет производить мультианализ их компонент с учетом расширения структуры последних.

Логико-алгебраическое описание внутренней структуры ИСОРТСМ. Схема организации внутренней структуры ИСОРТСМ Θ , представленная на (рис. 2), включает четыре блока РЕФИСАНИК¹ – структурных базовых единицы внутренней структуры ИСОРТСМ – РЕФИСАНИК ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ $P^{[U]}$, РЕФИСАНИК МЕГАПОЛИС $P^{[M]}$, РЕФИСАНИК ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА $P^{[V]}$, РЕФИСАНИК ТРАНСПОРТНЫЕ КОММУНИКАЦИИ $P^{[C]}$. Центром ИСОРТСМ является PPC.

Формально внутреннюю структуру ИСОРТСМ зададим следующим выражением:

$$\Theta_{in} \ni \begin{cases} P^{[U]} \ni \langle Y_U, S_U, A_U, I_U, \xi_U \rangle \\ P^{[T]} \ni \langle Y_T, S_T, A_T, I_T, \xi_T \rangle \\ P^{[M]} \ni \langle Y_M, S_M, A_M, I_M, \xi_M \rangle \\ P^{[V]} \ni \langle Y_V, S_V, A_V, I_V, \xi_V \rangle \\ [\Sigma] \\ [\Phi] \end{cases} \quad (3)$$

Система [Т] как внешний блок ИСОРТСМ (рис. 1) разделяется на две составляющие: транспортные средства [V] и транспортные коммуникации [ТС], которые рассматриваются как отдельные взаимосвязанные развивающие единицы, а система управления [Ф] образует внешний контур.

Рассмотрим структуру РЕФИСАНИК, представленную на (рис. 3).

Общая структура РЕФИСАНИК состоит из следующих элементов: селекционный фильтр – Y ; блок система – S ; блок анализа – A ; индикаторное множество показателей эффективности системы – I ; комбинаторный расширитель индикаторных связей – ξ (КРИС). Таким образом, структура РЕФИСАНИК интерпретируется выражением

$$P \ni \langle Y, S, A, I, \xi \rangle. \quad (4)$$

Изолированно рассмотрим структуру элементов РЕФИСАНИК.

Блок система S . В общем виде блок S задается множеством взаимосвязанных, организованных элементов, различных классов

$$S : \mathcal{E} = \{ \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \}, \quad (5)$$

где ε_i – элемент системы S .

Классы на множестве элементов системы S формирует операция разбиения f_μ^d множества S на непересекающиеся совокупности подмножеств согласно:

$$f_\mu^d : S = \bigcup_{\mu=1}^R S_\mu \quad |S_\mu| = d_\mu, \quad (6)$$

где $\mu = 1, \dots, \mu$ – классы разбиения; $d_\mu = 1, \dots, R$ – глубина классов разбиения.

¹ РЕФИСАНИК – РЕляционный ФИльтр Селективного АНализа Индикаторного Комбинаторного расширения связей

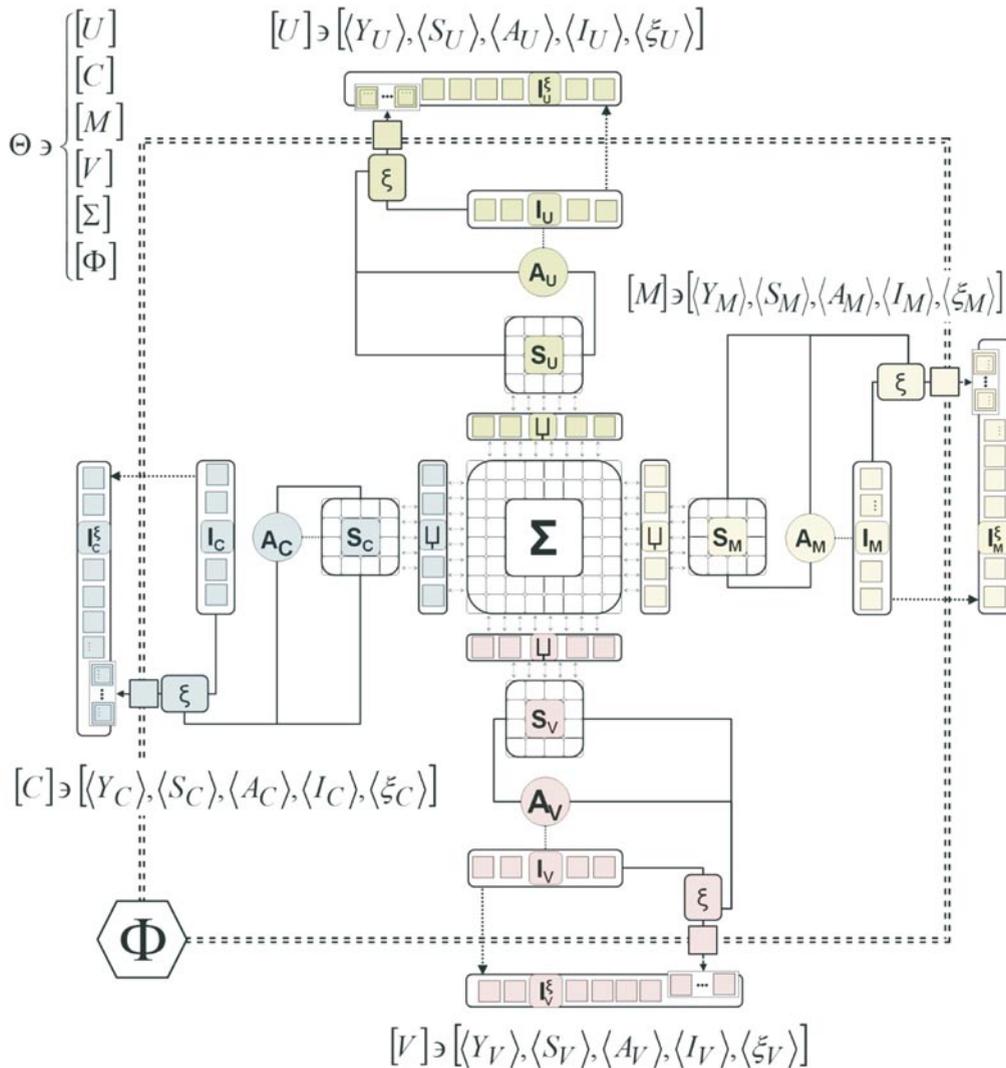


Рис. 2. Схема внутренней структуры ИСОПТСМ

Для регистрации, хранения и работы с данными элементами системы введем операцию идентификации f_{id} ее элементов согласно:

$$f_{id} : S \xrightarrow{\forall \{e_i\} \in S} I, \quad (7)$$

где $I = \{i_d\}$ – множество уникальных номеров, т. е. существует и определено отображение f_{id} , которое каждому объекту из S ставит в соответствие уникальный номер $i_{dk} \in I$.

Каждый элемент системы ε_r , выраженный уникальным номером i_d , должен быть параметризован определенным набором свойств. Зададим для этого операцию f_{CH} которая каждому уникальному номеру i_{dk}

ставит в соответствие набор характеристик, присущих данному объекту, согласно следующему выражению:

$$f_{CH} : S \xrightarrow[\{e_i\} \in \{i_d\}]{\forall \{e_i\} \in S} CH, \quad (8)$$

где $CH = \{ch_a^{i_d}, a = 1, \dots, n_a, i = 1, \dots, n\}$ – множество характеристик элементов системы S .

Атрибуты определенной характеристики, отражающие свойство каждого элемента системы, согласно принципам нормализации задаются кортежем $ch_a^{i_d} = \{[i_d], [name\ character], [attribute\ values], \{set_{av}\}\}$, где $[i_d] \in I$ – уникальный номер каждого элемента, $[name\ character]$ – имя характеристики, выраженное множеством определения,

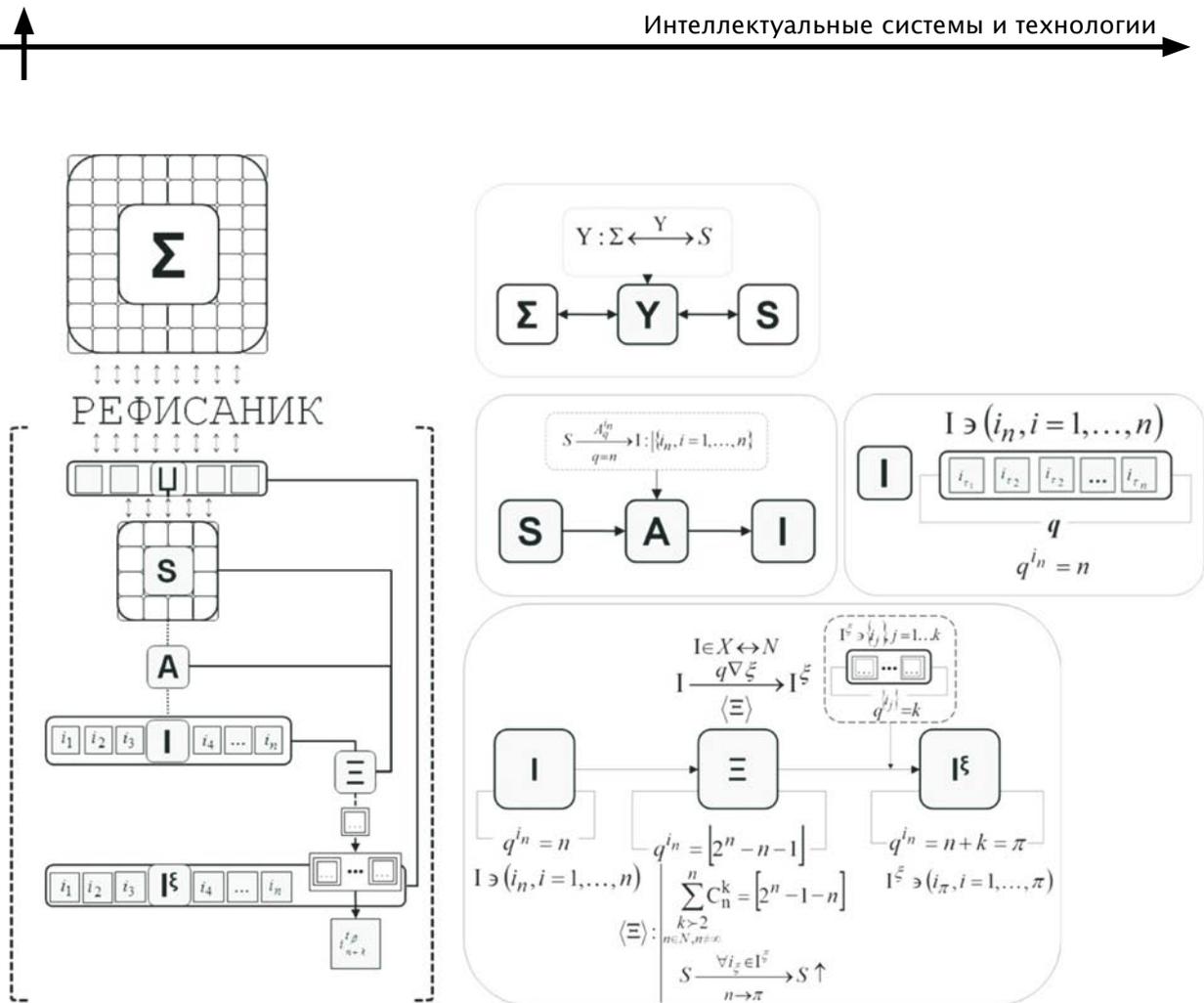


Рис. 3. Схема функционирования системы РЕФИСАНИК

[attribute value] – атрибут характеристики, выраженный областью определения, [set_{av}] – численное значение определенного атрибута характеристики.

Графически процесс построения организации блок системы S интерпретирован на рис. 4.

В случае если описание свойств каждого элемента системы предполагает динамический характер развития, может быть задана хронологическая операция f_i следующего вида:

$$f_i : S \xrightarrow[\{e_i\} \ni \{i_d\}]{\forall \{e_i\} \in S} \langle \tau_T^{\det} \vee (\tau_T; \tau_{T+i}) \rangle, \quad (9)$$

где $\tau_T^{\det} \in T$ – определенный момент времени; T – множество моментов или интервалов времени; при контроле f_i можно опереться на «шестую нормальную форму», а для проверки условий, связанных с интервалами, – на операторы Аллена.

Процесс структурно-функциональной организации элементов ε_i в системе S за-

дадим операцией поиска $f_{r_{low}}^{\varepsilon_i}$ оптимального условия структурно-функционального взаимодействия элементов системы согласно

$$f_{r_{low}}^{\varepsilon_i} : S \xrightarrow[\{e_i\} \ni \{i_d\}]{\forall \{e_i\} \in S} \langle r_i^{low} \in R \rangle. \quad (10)$$

Структурно-функциональная организация для каждого элемента $[\varepsilon_i \in i_d]$ в системе подчинена определенному условию структурно-функционального взаимодействия r_i^{low} .

Частично пример организации системы транспорт приведен в [28], а пример определения оптимальных условий структурно-функционального взаимодействия элементов транспортной системы разработан в [32].

Блок анализа (A). Блок анализа производит оценку значений индикаторов внутри каждого РЕФИСАНИКа. Графическое пояснение процесса оценки индикаторов внутри блока анализа представлено на рис. 5, а формально задается выражением:

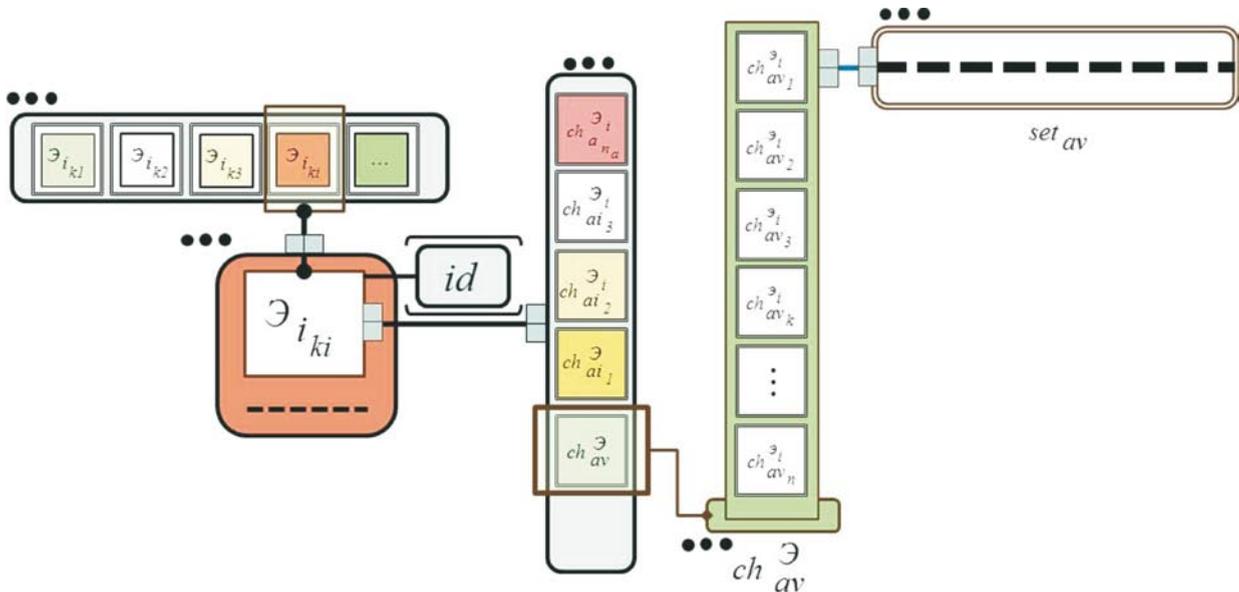


Рис. 4. Схема построения процесса организации блока системы S

$$A : \left| I^{[etalon]} - I^{[real]} \right| \xrightarrow{f^{[compare]}, f^{[diagnos]}} R, \quad (11)$$

$$I^{[real]} \times R = I^{[etalon]},$$

где $I^{[etalon]} = \{i_{\gamma}^{[et]}, \gamma = 1 \dots n_{iet}\}$ – эталонное множество индикаторов; $i_{\gamma}^{[et]}$ – эталонное значение определенного индикатора; $I^{[real]} = \{i_{\gamma}^{[r]}, \gamma = 1, \dots, n_{iet}\}$ – реальное множество показателей; $i_{\gamma}^{[r]} = i_{id} [o_{ch_{id} \times \delta}] f(set_{av_i}^{eid}, \tau)$ – текущее значение индикатора за определенный период или момент времени τ ; $ch_{av_i}^i = f(set_{av_i}^{eid}, \tau)$ – текущее значение определенной характеристики элемента \mathfrak{E}_i , входящего в вычисляемый индикатор $i_{\gamma}^{[r]}$; $[o_{ch_{id} \times \delta}]$ – оператор маршрутизации связи текущего значения индикатора i_{id} , характеристики ch_{id} и действия над ними δ ; $I^{[etalon]} = \{i_{\gamma}^{[et]}, \gamma = 1, \dots, n_{iet}\}$ – множество эталонных значений показателей; $i_{\gamma}^{[et]}$ – эталонное значение определенного индикатора эффективности; $f^{[compare]}$ – функция сравнения текущего значения $i_{\gamma}^{[r]}$ индикатора с эталонным $i_{\gamma}^{[et]}$; $f^{[diagnos]}$ – функция диагностирования причинно-следственных отношений между индикаторами, выявляющая причину отклонения значений текущих индикаторов от эталонных; R – регулирующее воздействие, удерживающее значение индикаторов в рамках допустимых отклонений.

Блок интегральных индикаторов (БИИ) (I). Интегральное индикаторное множество $[Integ]$ зададим множеством индикаторов эффективности $I = \{i_n\}$ и множеством условий $Y = \{y\}$, при котором они достигают оптимального значения, согласно

$$[Integ] = \langle I \wedge Y \rangle. \quad (12)$$

Формирование множества индикаторов эффективности $I = \{i_n\}$ реализуется оператором f_i , посредством которого происходит перемещение результирующих индикаторов из блока A в блок I , согласно

$$A \xrightarrow{f_i} I, \quad (13)$$

при этом множества $I^{[real]}$ и I равномощны:

$$|I^{[real]}| = |I|. \quad (14)$$

Формирование множества условий $Y = \{y\}$ реализуется оператором f_y , согласно

$$A \xrightarrow{f_y} I. \quad (15)$$

Блок КРИС. Реализует процесс расширения количества индикаторов индикаторного множества и совершенствование блока анализа.

Процесс работы блока КРИС задается следующим образом.

Пусть система индикаторов имеет ко-

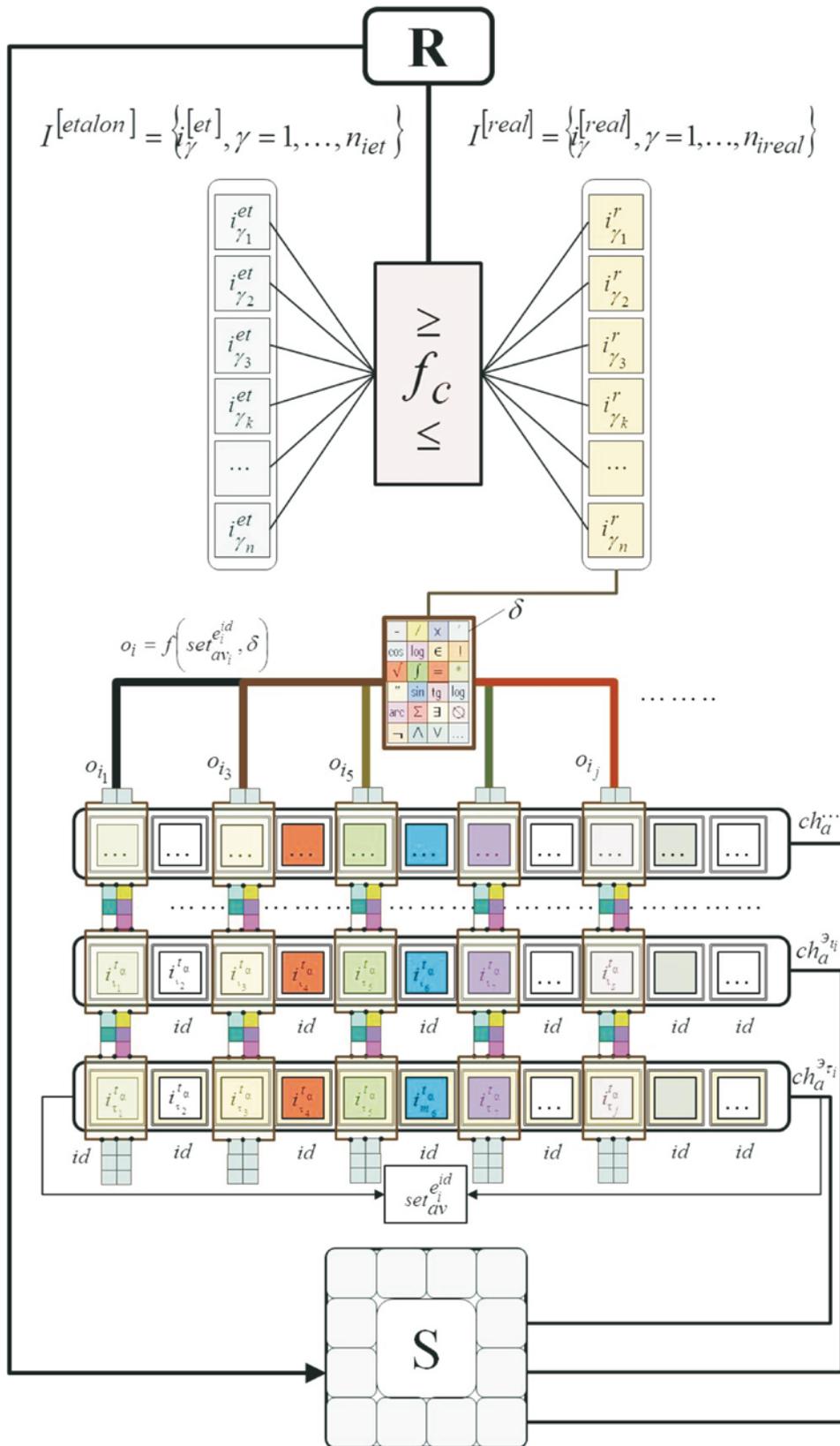


Рис. 5. Схема построения блока анализа

личество q индикаторов i , равных n , тогда можно записать:

$$q_i = n. \quad (16)$$

Пусть оператор f_ψ отображает индикаторное множество $[I, q_i = n]$ из БИИ в блок КРИС согласно

$$f_\psi : I \xrightarrow[\{i\}]{f_\psi} \Xi, \quad (17)$$

где $I = \{i_n\}$.

Тогда операция ξ расширения индикаторов производится согласно

$$\xi : k_i = 2^n - n - 1. \quad (18)$$

Поясним принципы работы КРИС на практическом примере.

Пример работы КРИС. Пусть множество I состоит из $3(n=3)$ индикаторов: $I = \langle N_v, S_M, N_h \rangle$, где N_v – общее количество автомобилей в мегаполисе, S_M – площадь мегаполиса, N_h – общее количество жителей в мегаполисе. Тогда согласно (18) операция КРИС имеет вид $\xi : k_i = 2^n - n - 1 = 2^3 - 3 - 1 = 2^3 - 3 - 1 = 4$, а схема расширения индикаторов для рассматриваемого примера показана на рис. 6.

Индикаторы q_1, q_2, q_3, q_4 представляют показательные связи ($n1$), которые могут быть образованы между элементами I , а следовательно, задан закон организации последнего:

$$q_1 = \frac{S_M}{N_v}, q_2 = \frac{S_M}{N_h}, \quad (n1)$$

$$q_3 = \frac{N_v}{N_h}, q_4 = \frac{S_M}{\sqrt{N_v N_h}},$$

где q_1 – плотность ТрСр в мегаполисе, км²/ед. т. с.; q_2 – плотность жителей в мегаполисе, км²/чел.; q_3 – процент жителей мегаполиса, имеющих автомобиль, %; q_4 – обеспеченность территории мегаполиса с учетом общего количества жителей и ТрСр, б. р.

Таким образом, общее количество индикаторов потенциально может быть расширено с трех до семи, то есть $I \in \langle N_v, S_M, N_h, q_1, q_2, q_3, q_4 \rangle$.

Селекционный фильтр (СФ). Блок СФ (Y) производит отбор индикаторов структурно-функционального элемента рассматриваемой системы S для перемещения его в РРС.

В основу функционирования СФ по-

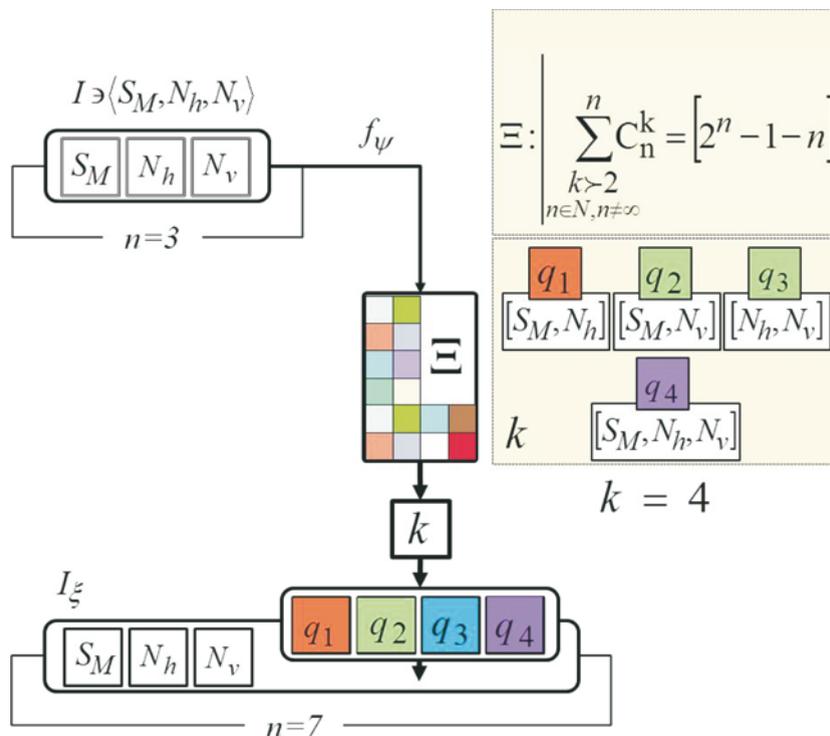


Рис. 6. Схема комбинаторного расширения индикаторов

ложим общий метод просеивания Сильва–Сильвестра, который задается следующим образом.

Пусть элементы $A_i \subset A$ обладают свойством P_i , $I = 1, 2, \dots, n$, тогда подмножество $A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k$ обладает свойством $P_{i_1} \wedge P_{i_2} \wedge \dots \wedge P_{i_k}$.

Таким образом, если элементы A могут обладать n различными свойствами, то число элементов A , обладающих k указанными свойствами и не обладающих $n - k$ остальными, задаются оператором f_{sift} согласно

$$\begin{aligned}
 f_{sift} : Card(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap \bar{A}_{k+1} \cap \bar{A}_{k+2} \cap \dots \\
 \dots \cap \bar{A}_n) = Card(A_1 \cap \dots \cap A_k) - \\
 - Card(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap A_{k+1}) - \dots \\
 \dots - Card(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap A_n) + \\
 + Caard(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap A_{k+1} \cap A_{k+2}) + \dots \\
 \dots + Card(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap A_{n-1} \cap A_n) + (-1)^{n-k} \times \\
 \times Card(A_1 \cap \dots \cap A_k \cap A_{k+1} \cap A_{k+2} \cap \dots \cap A_n),
 \end{aligned} \tag{19}$$

где A – конечное множество; $A_i \subset A$, \bar{A}_i – дополнение A_i по отношению к A ; $Card A$ – число элементов во множестве A .

В случае невыделенных множеств, когда множества не выделяются, а фиксируется только число свойств, которыми обладают их элементы, оператор f_{sift} имеет вид:

$$\begin{aligned}
 W(k) = w(k) - C_{k+1}^1 w(k+1) + \\
 + C_{k+2}^2 w(k+2) - \dots + (-1)^{n-k} C_n^{n-k} w(n),
 \end{aligned} \tag{20}$$

где $W(k)$ – число элементов во множестве A , удовлетворяющих k свойствам.

Пример работы селекционного фильтра. Дано множество V , такое что $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}\}$, где $\{v\}$ – множество различных ТрСр, обладающих свойствами, указанными в таблице.

Подсчитаем число элементов V , обла-

дающих следующими свойством: $P_1 \wedge$ не $P_2 \wedge$, не P_3 , то есть $P_1 \wedge \bar{P}_2 \wedge \bar{P}_3$.

Решение. Обозначим подмножества, соответствующие свойствам P_1, P_2, P_3 , через A_1, A_2, A_3 . Тогда, $Card(A_1 \cap \bar{A}_2 \cap \bar{A}_3) = Card(A_1) - Card(A_1 \cap A_2) - Card(A_1 \cap A_3) + Card(A_1 \cap A_2 \cap A_3)$.

Просеиваем V через P_1 : $Card(A_1) = 5$.

Просеиваем A_1 через P_2 и P_3 : $Card(A_1 \cap A_2) = 2$, $Card(A_1 \cap A_3) = 2$.

Просеиваем $A_1 \cap A_2$ через P_3 : $Card(A_1 \cap A_2 \cap A_3) = 0$.

В итоге

$$Card(A_1 \cap \bar{A}_2 \cap \bar{A}_3) = 5 - 2 - 2 + 0 = 1.$$

Таким образом, через процедуру просеивания мы определили, что только транспортное средство v_2 обладает свойством P_1 и не обладает свойствами P_2 и P_3 , то есть является легковым не электрическим и не полноприводным автомобилем.

Реляционный регулятор согласования (РРС). РРС зададим набором операторов: оператор реляционного объединения элементов систем $U, C, M, V - f_{US}$; оператор реляционного объединения свойств (индикаторов) элементов систем $U, C, M, V - f_{US}^P$; реляционного согласования (РС) систем $U, C, M, V - f_{\Sigma}$.

Процесс РС реализуется последовательностью: на вход в БСРРС поступают просеянные согласно (19, 20) элементы систем и подвергаются процедуре реляционного объединения f_{US} :

$$f_{US} : \Sigma_S = \bigcup_{f_{sift}}^Y S_U \cup \bigcup_{f_{sift}} S_V \cup \bigcup_{f_{sift}} S_M \cup \bigcup_{f_{sift}} S_C. \tag{21}$$

Графически процесс построения f_{US} представлен на рис. 7.

Область Σ_S на рисунке формально отражает набор просеянных элементов систем U, C, M, V .

Свойство транспортных средств

Объект [И]/Свойство [P]		v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅	v ₆	v ₇	v ₈	v ₉	v ₁₀
		P_1	Легковые авто		•		•		•		•
P_2	Электрические авто							☀	☀	☀	☀
P_3	Полноприводные авто			○	○	○	○	○			

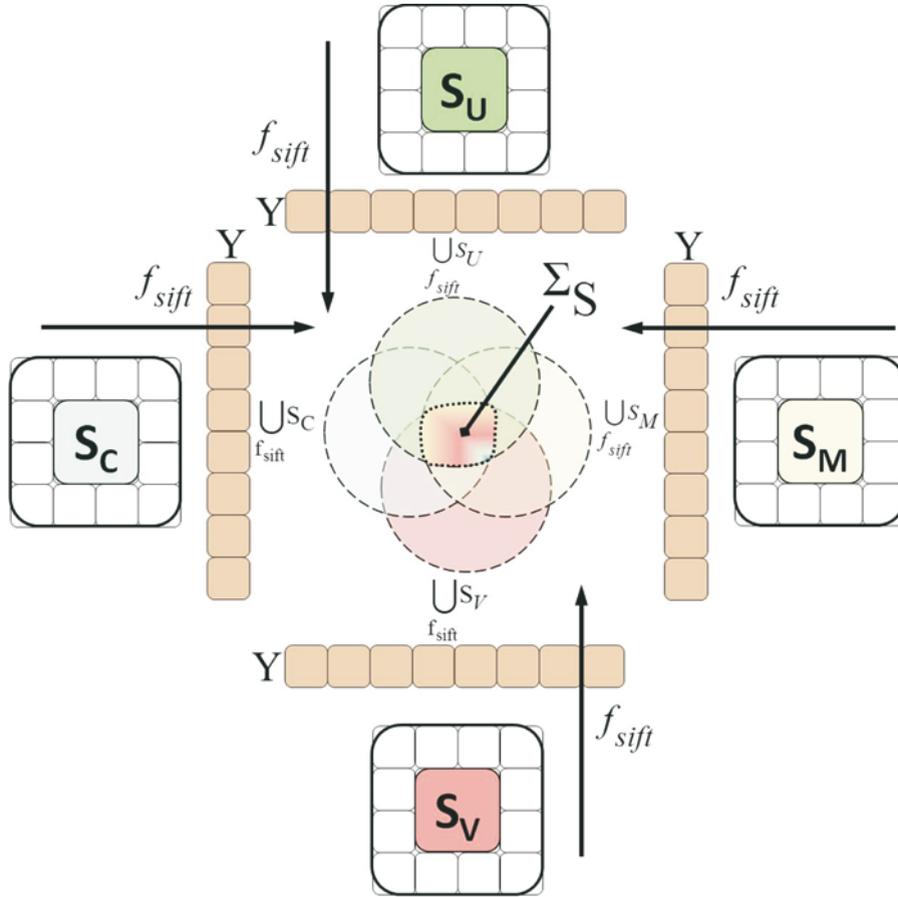


Рис. 7. Схема построения множества Σ_S

Параллельно с процессом f_{US} реализуется процедура f_{US}^P , согласно которой поступившие в РРС свойства соответствующих элементов систем после процедуры просеивания f_{sift}^P подвергаются процессу (22) реляционного объединения свойств f_{US}^P :

$$f_{US}^P : \left\langle \begin{matrix} [S_U]_{sift}^{P_U} \\ [S_C]_{sift}^{P_C} \\ [S_M]_{sift}^{P_M} \\ [S_V]_{sift}^{P_V} \end{matrix} \right\rangle \in \Sigma_S^P, \quad (22)$$

где $[S_U]_{sift}^{P_U}$, $[S_C]_{sift}^{P_C}$, $[S_M]_{sift}^{P_M}$, $[S_V]_{sift}^{P_V}$ – свойства элементов систем U , C , M , V после процедуры просеивания (рис. 8).

Область Σ_S^P формально отражает набор просеянных элементов систем U , C , M , V .

Упорядоченные наборы просеянных

свойств систем подвергаются процедуре реляционного согласования f_Σ :

$$f_\Sigma : \left(\bigcap_{[S_n]_{sift}^{P_n}} C_{S_n}^k \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_\Phi]_{perf}^{P_\Phi} \longrightarrow \left(\bigcap C_{S_n}^k \right) = \begin{cases} \emptyset \longrightarrow \left(\bigcap C_{S_n}^k \right) \tilde{\otimes} R_{S_{n \vee n}}^\Phi \\ \neq \emptyset \longrightarrow \left(\bigcap C_{S_n}^k \right) \end{cases}, \quad (23)$$

где f_Σ – реляционный оператор согласования; $[S_n]_{sift}^{P_n}$ – упорядоченные множества после просеивания, содержащие элементы с параметрическим указанием свойств; n – количество систем, $n = 4$, то есть U , C , M , V ; k – количество наборов подсистем $k = 2^n - 1$, подлежащих согласованию; $[S_\Phi]_{perf}^{P_\Phi}$ – упорядоченные множества, содержащие элементы с эталонными параметрами свойств; Φ – функционал управления сравниваемых индикаторных множеств систем (свойств систем); *perf.* (*perfect* – со-

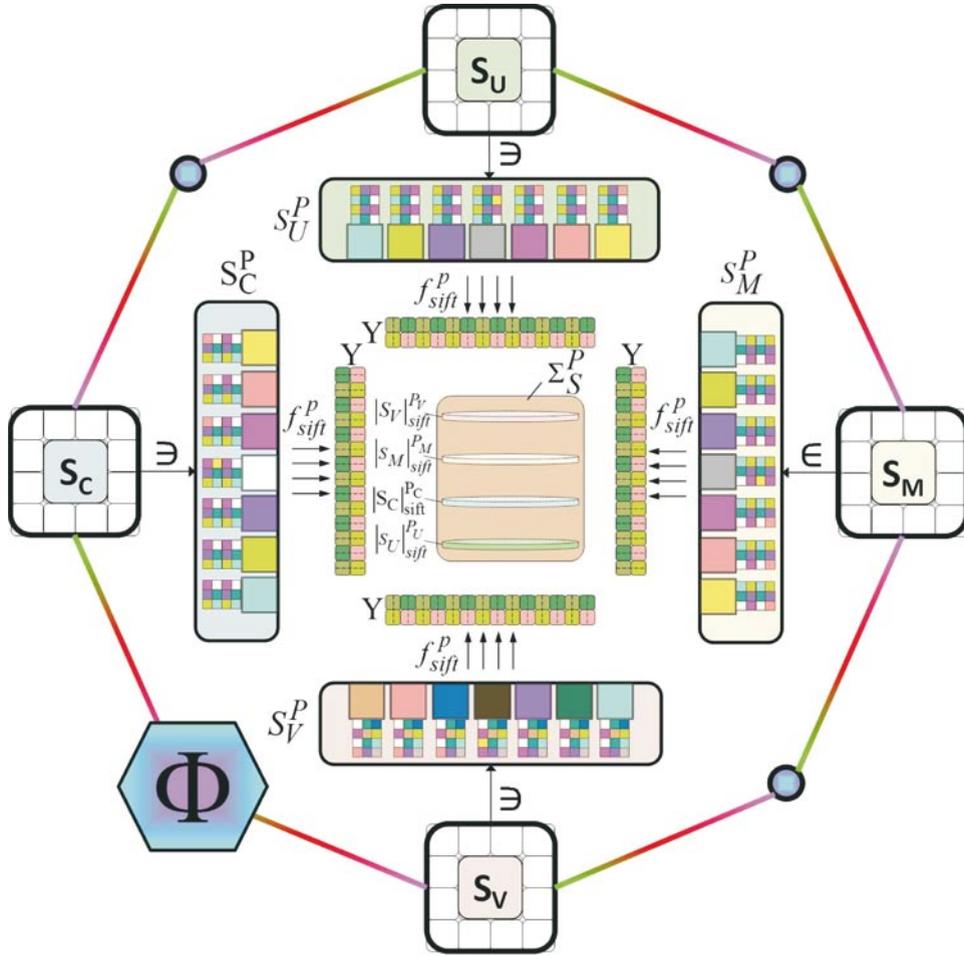


Рис. 8. Схема построения множества Σ_S^P

вершенный, идеальный) – индекс, указывающий на эталонные значения сравниваемых индикаторов; $\cap C_{|s_i, l_{s_i}^p}^k$ – разностное сочетание упорядоченных свойств систем после просеивания с параметрическим указанием свойств; $\left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle^{CPR}$ – оператор сравнения, указательный индекс над оператором CPR означает сравнение (*compare* – сравнение); $\tilde{\otimes} = \left\langle \begin{matrix} \cup \\ \text{CONST} \end{matrix} \right\rangle$ – оператор развития систем U, C, M, V .

Раскроем первую часть процедуры реляционного согласования (23) согласно (см. (24)).

Раскроем вторую часть процедуры ре-

ляционного согласования (23), согласно (см. 25), где $R_{s_{\wedge \bar{v}}}^\Phi$ – реляционное расширение элементов (РРЭ) системы пользователь с параметрическим указанием свойств (ПУС); $R_{s_{\wedge C}}^\Phi$ – РРЭ коммуникационной системы с ПУС; $R_{s_{\wedge M}}^\Phi$ – РРЭ системы мегаполис с ПУС; $R_{s_{\wedge P}}^\Phi$ – РРЭ системы ТрСр с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{v}, \bar{c} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ системы пользователь и/или коммуникационной системы с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{c}, \bar{m} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ коммуникационной системы и/или системы мегаполис с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{v}, \bar{v} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ системы пользователь и/или системы ТрСр с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{c}, \bar{v} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ коммуникационной системы и/или системы ТрСр с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{v}, \bar{m} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ системы ТрСр и/или системы мегаполис с ПУС; $R_{s_{\wedge \langle \bar{v}, \bar{c}, \bar{v} \rangle}}^\Phi$ – РРЭ системы ТрСр и/или коммуникацион-

$$\left(\bigcap_{[S_n]_{sift}^i}^k \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_\Phi]_{perf}^{P_\Phi} = \left[\begin{array}{l} \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=C,U}]_{perf}^{P_{\Phi=C,U}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=M,U}]_{perf}^{P_{\Phi=M,U}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=V,U}]_{perf}^{P_{\Phi=V,U}} \\ \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=C,M}]_{perf}^{P_{\Phi=C,M}} \\ \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=C,V}]_{perf}^{P_{\Phi=C,V}} \\ \left([S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=V,M}]_{perf}^{P_{\Phi=V,M}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U,C,V}]_{perf}^{P_{\Phi=U,C,V}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U,C,M}]_{perf}^{P_{\Phi=U,C,M}} \\ \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=C,V,M}]_{perf}^{P_{\Phi=C,V,M}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U,V,M}]_{perf}^{P_{\Phi=U,V,M}} \\ \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \right) \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U,V,M,C}]_{perf}^{P_{\Phi=U,V,M,C}} \\ [S_U]_{sift}^{P_U} \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U}]_{perf}^{P_{\Phi=U}} \\ [S_V]_{sift}^{P_V} \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=V}]_{perf}^{P_{\Phi=V}} \\ [S_C]_{sift}^{P_C} \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=C}]_{perf}^{P_{\Phi=C}} \\ [S_M]_{sift}^{P_M} \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=M}]_{perf}^{P_{\Phi=M}} \end{array} \right]. \quad (24)$$

ной системы и/или системы пользователь с ПУС; $R_{S_{\wedge\{U,M,C\}}}^\Phi$ – РРЭ системы пользователь и/или системы мегаполис и/или коммуникационной системы с ПУС; $R_{S_{\wedge\{U,V,M,C\}}}^\Phi$ – РРЭ системы ТрСр и/или системы мегаполис и/или коммуникационной системы;

$R_{S_{\wedge\{U,V,M\}}}^\Phi$ – РРЭ системы пользователь и/или системы ТрСр и/или системы мегаполис; $R_{S_{\wedge\{U,V,M,C\}}}^\Phi$ – РРЭ системы пользователь и/или системы ТрСр и/или системы мегаполис и/или коммуникационной системы. Подсчет общего количества согласова-

$$\left[\left(\bigcap_{S_n} C_n^k \right) \tilde{\otimes}_{\text{min}^*} R_{S_i}^\Phi \right] = \left[\begin{array}{l}
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{C})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{M})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{V})}^\Phi \\
 \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{C}, \bar{M})}^\Phi \\
 \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{C}, \bar{V})}^\Phi \\
 \left([S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{V}, \bar{M})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{C}, \bar{V})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{M}, \bar{C})}^\Phi \\
 \left([S_C]_{sift}^{P_C} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{V}, \bar{M}, \bar{C})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{V}, \bar{M})}^\Phi \\
 \left([S_U]_{sift}^{P_U} \cap [S_V]_{sift}^{P_V} \cap [S_M]_{sift}^{P_M} \cap [S_C]_{sift}^{P_C} \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee}(\bar{U}, \bar{V}, \bar{M}, \bar{C})}^\Phi \\
 ([S_U]_{sift}^{P_U}) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee\bar{U}}}^\Phi \\
 ([S_C]_{sift}^{P_C}) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee\bar{C}}}^\Phi \\
 ([S_V]_{sift}^{P_V}) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee\bar{V}}}^\Phi \\
 ([S_M]_{sift}^{P_M}) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge\vee\bar{M}}}^\Phi
 \end{array} \right]. \quad (25)$$

ний систем $U, C, M, V (n = 4) \square \bigcap_{n=4}$ в (24) и (25) определяется следующим выражением:

$$\bigcap_{n=4} = \sum_{k=1}^{k=n} \bigcap_k = \sum_{k=1}^{k=n} (k-1)C_n^k. \quad (26)$$

Тогда для (24) и (25) имеем:

$$\begin{aligned}
 \bigcap_{n=4} &= \sum_{k=1}^{k=n=4} \bigcap_k = \sum_{k=1}^{k=4} (k-1)C_n^k = (0)C_4^1 + \\
 &+ (1)C_4^2 + (2)C_4^3 + (3)C_4^4 = 0 \cdot 4 + 1 \cdot 6 + \\
 &+ 2 \cdot 4 + 3 \cdot 1 = 17.
 \end{aligned}$$

Таким образом, общее количество согласований составит $\bigcap_{n=4} = 17$.

Подсчет общего числа согласуемых наборов $(S)_{n=4}$ систем U, C, M, V в (24) и (25)

определяется следующим выражением:

$$(S)_{n=4} = \sum_{k=1}^{k=n} C_n^k = 2^n - 1. \quad (27)$$

Тогда для (24) и (25) имеем:

$$(S)_{n=4} = \sum_{k=1}^{k=n=4} C_n^k = 2^n - 1 = 2^4 - 1 = 15.$$

Таким образом, общее количество согласуемых наборов систем в РРС составит $(S)_{n=4} = 15$.

Рассмотрим процесс работы РРС на примере развития по температурному показателю ГТС, состоящей из пешеходного транспортного сообщения.

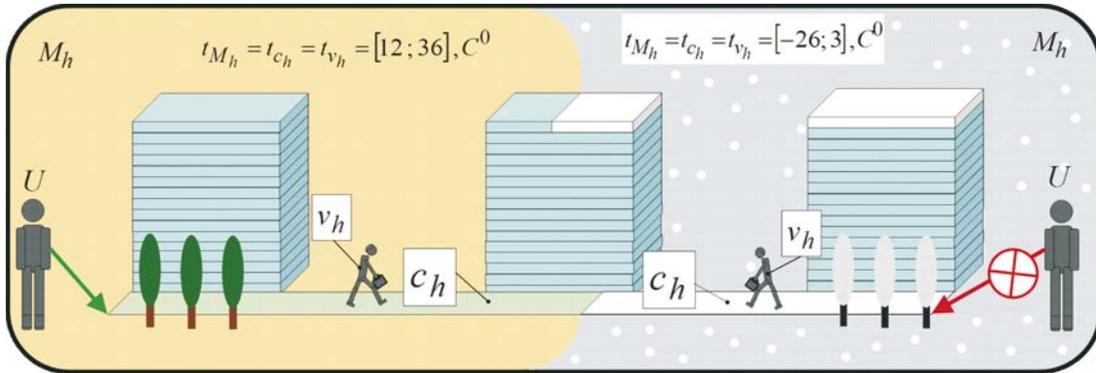


Рис. 9. Системы U, C, M, V , подлежащие реляционному согласованию

Пример работы PPC. Системы U, C, M, V заданы следующим набором свойств: система пользователь $S_U : t_{h_u} = [35; 38] \text{ } ^\circ\text{C}$; система мегаполис $S_M : t_M = [-26; 34] \text{ } ^\circ\text{C}$; система транспортных коммуникаций $S_C = c_h : t_{c_h} = [-26; 34] \text{ } ^\circ\text{C}$, где c_h – пешеходная транспортная коммуникация; система транспорт $S_V = v_h : t_{v_h} = [11; 18] \text{ } ^\circ\text{C}$, где v_h – пешеходный вид транспорта (рис. 9).

Требуется формально описать работу PPC в процессе развития ГТС по температурному показателю в границах пешеход-

ного транспортного сообщения.

Решение. Пусть на вход PPC поступают просеянные согласно (19) показатели систем U, C, M, V .

Так как процесс реляционного согласования (23) выполняется для одного показателя t , то первая часть выражения (24) примет вид:

$$f_{\Sigma} : \left(\cap_{[S_h]_{opt}^k} C^k \right) \left(\begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right) [S_{\Phi}]_{pref}^p = \quad (n2)$$

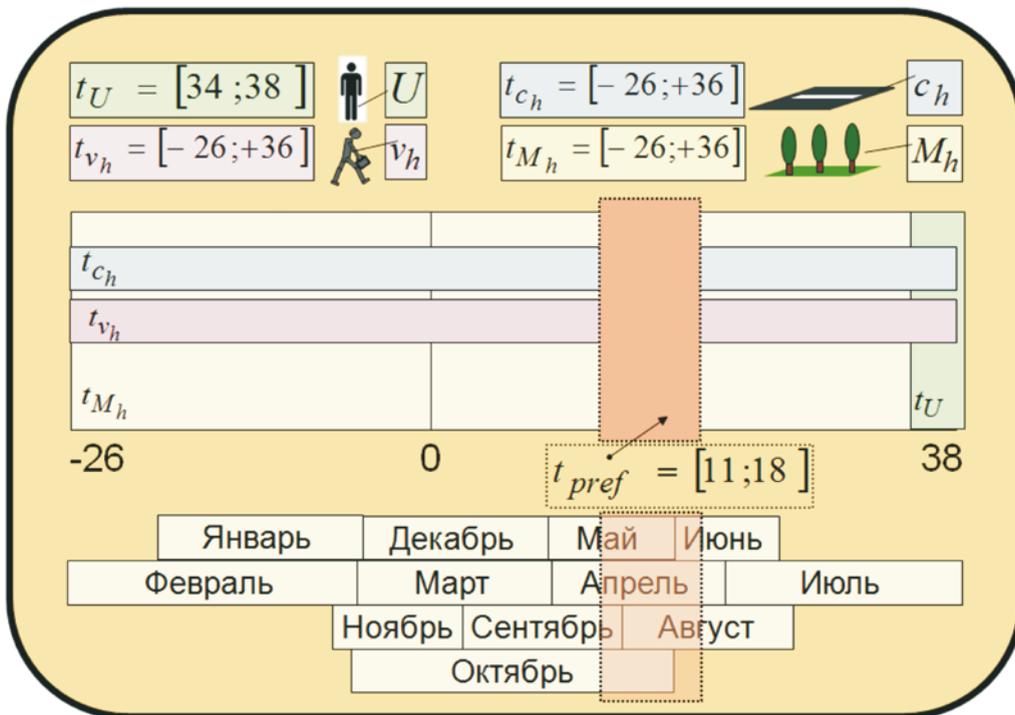


Рис. 10. Схематическая интерпретация реляционного согласования

$$= \left([t_U]_{sift}^{P_U} \cap [t_{v_h}]_{sift}^{P_{V_h}} \cap [t_{M_h}]_{sift}^{P_{M_h}} \cap [t_{c_h}]_{sift}^{P_C} \right) \times \left\langle \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\rangle [S_{\Phi=U,V,M,C}]_{perf}^{P_{\Phi=U,V,M,C}} = \emptyset. \quad (n2)$$

Графическая интерпретация (n2) представлена на рис. 10.

Анализ сравнения температурных показателей систем S_U, S_V, S_M, S_C с эталонным значением $t_{pref} = [11; 18]$ позволяет установить температурные режимы $t = \begin{cases} [-26; +11] \\ [+11; +38] \end{cases}$ и интервалы времени (ноябрь, декабрь, январь, февраль, март, ноябрь, сентябрь, октябрь, июль), при которых возникает нарушение функционирования среды жителей мегаполиса M_h и пешеходного транспортного сообщения v_h , то есть $f_{\Sigma} : \left(\cap C_{S_n}^k \right) = \emptyset$.

Для устранения выявленного температурного рассогласования РРС в соответствии с (23) осуществляет реляционное расширение области текущих значений показателей элементов системы U, C, M, V до

эталонного значения, согласно

$$\left[\left(\cap C_{S_n}^k \right) \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge \vee n}}^{\Phi} \right] = \left([t_U]_{sift}^{P_U} \cap [t_{v_h}]_{sift}^{P_{V_h}} \cap \left[\cap [t_{M_h}]_{sift}^{P_{M_h}} \cap [t_{c_h}]_{sift}^{P_C} \right] \tilde{\otimes} R_{S_{\wedge \vee \langle \bar{U}, \bar{V}, \bar{M}, \bar{C} \rangle}}^{\Phi} \right). \quad (n3)$$

Достижение требуемого значения температурного показателя возможно при возведении изолированной транспортной пешеходной коммуникации $c_h^{t_{pref}}$ и/или создании средств персонального температурного регулирования пользователя $t_{v_h}^{pref} (t_h^{pref})$, и/или построении изолированной искусственной окружающей среды мегаполиса $t_{M_h}^{pref}$ (рис. 11).

Руководствуясь условиями задачи, реляционное расширение области текущих значений показателей элементов системы U, C, M, V до эталонного значения температурного интервала $t_{pref} = [11; 18]$ будем осуществлять за счет развития пешеходной коммуникации c_h посредством возведения изолированной транспортной пешеходной коммуникации $c_h^{t_{pref}}$. Таким образом, результат работы РРС (23) примет вид:

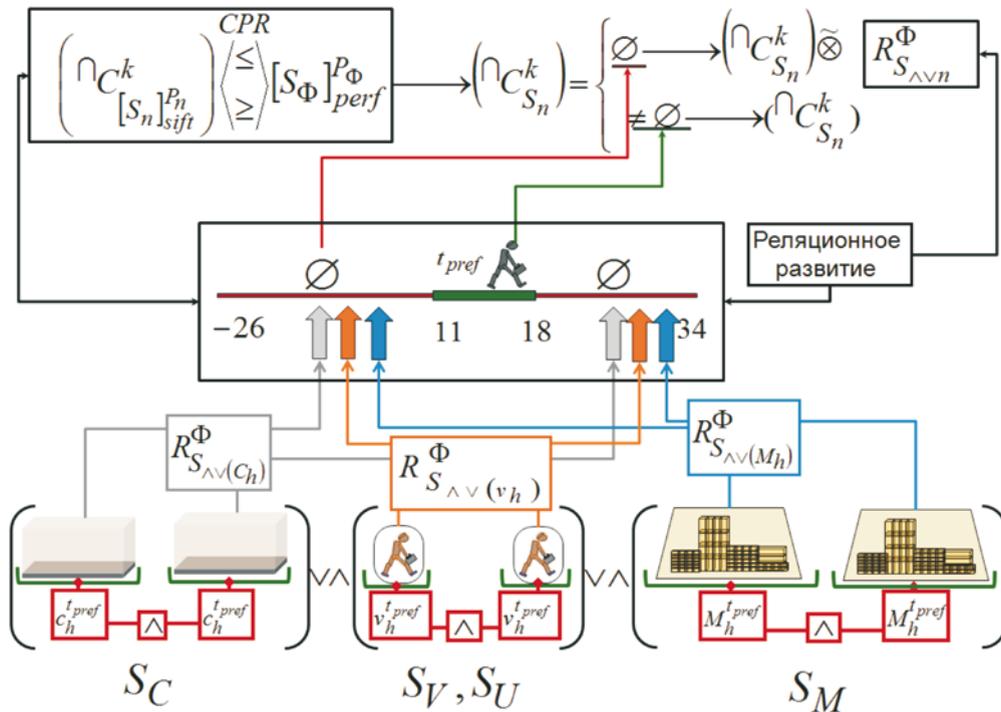


Рис. 11. Процесс реляционного расширения области текущих значений показателей элементов систем U, C, M, V

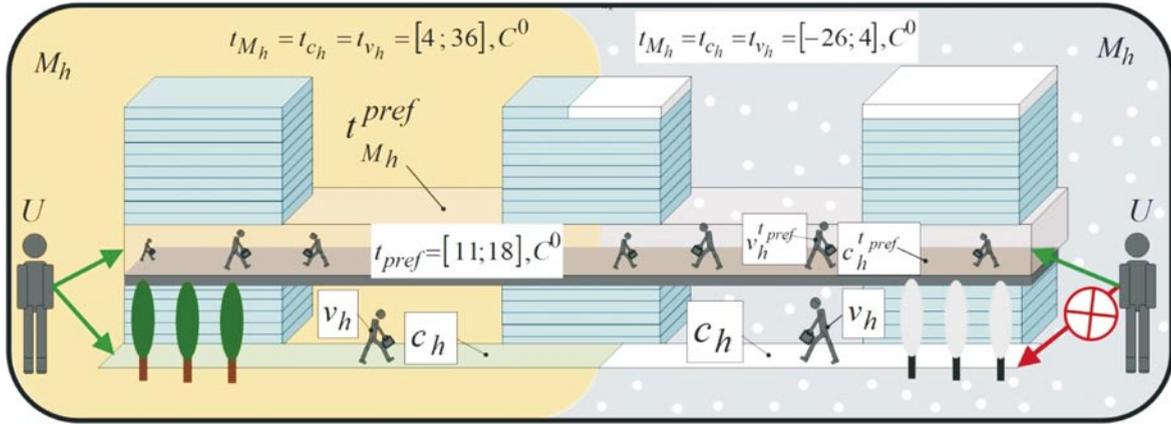


Рис. 12. Преобразованная ГТС по температурному показателю в границах пешеходного транспортного сообщения

$$\left([t_U]_{sift}^{P_U} \cap [t_{v_h}]_{sift}^{P_{v_h}} \cap [t_{M_h}]_{sift}^{P_{M_h}} \cap [t_{c_h}]_{sift}^{P_{c_h}} \right) \tilde{\otimes} \tilde{\otimes} R^{\Phi} \wedge \tilde{\otimes} (c_h^{t_{pref}}; t_{c_h}^{t_{pref}}) = \left([t_U]_{sift}^{P_U} \cup [t_U]_{sift}^{t_{pref}} \right) \cap \cap [t_{v_h}]_{sift}^{P_{v_h}} \cup [t_{v_h}]_{sift}^{t_{pref}} \cap [t_{M_h}]_{sift}^{P_{M_h}} \cup [t_{M_h}]_{sift}^{t_{pref}} \cap \cap [t_{c_h}]_{sift}^{P_{c_h}} \cup [t_{c_h}]_{sift}^{t_{pref}} \Big) = t_{c_h}^{t_{pref}} = t_{pref} = [11; 18]. \quad (n4)$$

В соответствии с рассматриваемым примером осуществляется реляционное переборное встраивание требуемых элементов систем U, C, M, V , приводящее тем самым к целевому функциональному развитию городской среды из структуры (рис. 9) к структуре (рис. 12), в которой согласующим элементом по температурному индикатору $t_{pref} = [11; 18]$ между системами U, C, M, V выступает новая изолированная транспортная пешеходная коммуникация $c_h^{t_{pref}}$, позволяющая реализовать непрерывное функционирование в требуемом $t_{pref} = [11; 18]$ температурном режиме.

Впервые произведена постановка задачи построения ИСОТСМ и разработаны ее внешняя и внутренняя архитектуры. Внешняя архитектура задана структурной схемой и ее логико-алгебраическим описанием.

Представленная формализация позволяет осуществить процесс мультиинтегрально-

го реляционного управления организацией и развитием систем транспорт, мегаполис и пользователь, в отличие от существующих [1, 4, 7], посредством встроенного регулятора реляционного согласования.

Для обеспечения структурной и функциональной однородности внутренней архитектуры ИСОТСМ впервые разработана система РЕФИСАНИК, которая является базовой единицей ИСОТСМ. На логико-алгоритмическом языке представлен синтез функционирования основных блоков системы РЕФИСАНИК и дано их полное формализованное описание.

На практических примерах продемонстрированы возможности блока КРИС и блока СФ и показаны пути увеличения эффективности системы РЕФИСАНИК, основанные на оптимизации его индикаторов. Применение КРИС позволяет впервые осуществлять процедуру управляемого поиска новых связей внутри заданного индикаторного множества, при этом последнее может быть сформировано с использованием [10, 13–17, 19]. Применение фильтрации индикаторов, реализованной в блоке СФ, дает возможность на определенных заданных условиях формировать вектор внутренних параметров пошаговой оптимизации системы.

Произведено структурно-функциональное построение РРС, формализация произведена с использованием логико-алгоритмического аппарата. На практиче-



ском примере продемонстрирована работа РРС в процессе развития ГТС по температурному показателю в границах пешеходного транспортного сообщения.

Таким образом, предложенная архитектура согласуется с интеллектуальными моделями систем управления ГТС [4, 5, 7, 22] и логистикой [33] и может быть интегри-

рована в обобщенную систему управления мегаполисом [1, 2, 4]. Подобная интеграция позволит перейти к построению качественно новых и более эффективных систем интеллектуального управления, по сравнению с [1, 4, 5, 7, 22], и устранить неопределенности процесса организации и развития городской среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y.** Smart cities of the future // *The European Physical Journal Special Topics*. 2012. Vol. 214. Iss. 1. Pp. 481–518.
2. **Каримов Т.Н., Симонова Л.А.** Интеллектуальная система поддержки принятия решения для оперативного управления транспортными потоками // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. № 1(115). С. 37–41.
3. **Шилов М. М., Воробьева О.С., Кракау Т.К.** Применение систем технического зрения и средств нечётких вычислений в интеллектуальных устройствах автоматизации и робототехники // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 2(97). С. 75–79.
4. **Zhang Xiong, Hao Sheng, WenGe Rong, Dave E.** Cooper Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review // *Science China Information Sciences*. 2012. Vol. 55. Iss. 12. Pp. 2908–2914.
5. **Lieskovsky A., Bad'ura Š., Mokryš M.** Proceedings in Intelligent Transportation Systems 2013 // *Virtual Conf. EDIS – Publishing Institution of the University of Zilina*. 2013. 173 p.
6. **Yokota T., Weiland R.J.** ITS Technical Note For Developing Countries. World Bank. 2014. 16 p.
7. **Nowacki G.** Development and Standardization of Intelligent Transport Systems // *TransNav, the Internat. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2012. Vol. 6. No. 3. Pp. 403–411.
8. **Waddell P.** UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning // *J. of the American Planning Association*. 2002. Vol. 68. No. 3. Pp. 297–314.
9. **Попов А.В., Аксёнов К.А., Доросинский Л.Г.** Интеллектуальная система моделирования логистических процессов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 1(93). С. 68–74.
10. **Armando Carlos de Pina Filho, Aloisio Carlos de Pina.** Methods and Techniques in Urban Engineering. InTech, 2010. 270 p.
11. **Белый О.В., Кокаев О.Г., Попов С.А.** Архитектура и методология транспортных систем. СПб.: Элмор, 2002.
12. **Белый О.В.** Проблемы построения и развития транспортных систем. СПб.: Элмор, 2012. 192 с.
13. **Morichi S., Acharya S.R. (eds.)** Transport Development in Asian Megacities, Transportation Research, Economics and Policy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 276 p.
14. **Дубов В.М., Капустянская Т.И., Попов С.А., Шаров А.А.** Проблематика сложных систем (концептуальные основы модельных представлений). СПб.: Элмор, 2006. 184 с.
15. **Rodrigue J.-P., Comtois C., Slack B.** The Geography of Transport Systems. 3rd Ed. New York: Routledge, 2013. 416 p.
16. **Сафронов Э.А.** Транспортные системы городов и регионов: Учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2005. 272 с.
17. **Кашкина Л.В.** Основы градостроительства: Учеб. пособие. М.: Гуманитар. изд. центр ВЛАДОС, 2005. 247 с.
18. **Te Brömmelstroet M., Bertolini L.** Integrating land use and transport knowledge in strategy-making // *Transportation*. 2010. Vol. 37. Iss. 1. Pp. 85–104.
19. **Zito P., Salvo G.** Toward an urban transport sustainability index: an European comparison // *Eur Transp. Res. Rev.* 2011. Vol. 3. Pp. 179–195.
20. **Priester R., Miramontes M., Wulffhorst G.** A generic code of urban mobility: how can cities drive future sustainable development? // *Sustainable Mobility in Metropolitan Regions*. mobil.TUM. Internat. Scientific Conf. on Mobility and Transport. Conf. Proc. Transportation Research Procedia. 2014. Vol. 4. Pp. 90–102.

21. **Colonna P., Berloco N., Circella G.** The Interaction between Land Use and Transport Planning: a Methodological Issue // 5th Internat. Congress Sustainability of Road Infrastructures. Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012. Vol. 53. Pp. 84–95.

22. **Федосов Д.В.** Методика выбора варианта подсистемы связи в системах транспортного мониторинга // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. № 6(138). С. 7–12.

23. **Шкодырев В.П.** Инновационные технологии в задачах управления большими распределенными системами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. № 3(154). С. 73–77.

24. **Герасимов В.Н.** Система управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. № 5(181). С. 94–102.

25. **Никитин К.В., Бендерская Е.Н.** Новый подход к применению рекуррентных нейронных сетей для решения задач распознавания образов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. № 4. Т. 2. С. 85–92.

26. **Селиверстов С.А.** Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2014. Вып. 2(24). С. 92–100.

27. **Селиверстов Я.А.** О построении моде-

ли классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // Научное ведение. 2014. № 5. С. 188.

28. **Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Стариченков А.Л.** Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 1. С. 29–36.

29. **Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А.** Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 4 (199). С. 34–48.

30. **Селиверстов Я.А.** Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора // Научное ведение. 2014. № 4. С. 90.

31. **Селиверстов Я.А., Стариченков А.Н.** Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 6(210). С. 81–94.

32. **Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А.** Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // Научное ведение. 2014. № 3. С. 122.

33. **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.

REFERENCES

1. **Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y.** Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 2012, Vol. 214, Issue 1, Pp. 481–518.

2. **Karimov T.N., Simonova L.A.** Intellektualnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya dlya operativnogo upravleniya transportnymi potokami [Intelligent decision support system for operational management of traffic flows]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems].

St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2011, No. 1(115), Pp. 37–41. (rus)

3. **Shilov M.M., Vorobyeva O.S., Krakau T.K.** Primeneniye sistem tekhnicheskogo zreniya i sredstv nechetkikh vychisleniy v intellektualnykh ustroystvakh avtomatiki i robototekhniki [The machine vision systems and fuzzy logic approach for intellectual systems of automation and robotics]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010, No. 2(97), Pp. 75–79. (rus)

4. **Zhang Xiong, Hao Sheng, WenGe Rong, Dave E. Cooper** Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review. *Science China Information Sciences*, 2012, Vol. 55, Issue 12, Pp. 2908–2914.
5. **Lieskovsky A., Bad'ura Š., Mokryš M.** *Proceedings in Intelligent Transportation Systems. Virtual Conference*. EDIS Publishing Institution of the University of Zilina, 2013, 173 p.
6. **Yokota T., Weiland R.J.** *ITS Technical Note For Developing Countries*. World Bank, 2014, 16 p.
7. **Nowacki G.** Development and Standardization of Intelligent Transport Systems. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2012, Vol. 6, No. 3, Pp. 403–411.
8. **Waddell P.** UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning. *Journal of the American Planning Association*, 2002, Vol. 68, No. 3, Pp. 297–314.
9. **Popov A.V., Aksenov K.A., Dorosinskiy L.G.** Intellektualnaya sistema modelirovaniya logisticheskikh protsessov [Intelligent system modeling of logistic processes]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010, No. 1(93), Pp. 68–74. (rus)
10. **A. Carlos de Pina Filho, Al. Carlos de Pina** Methods and Techniques in Urban Engineering. *InTech*, 2010, 270 p.
11. **Belyy O.V., Kokayev O.G., Popov S.A.** *Arkhitektura i metodologiya transportnykh sistem [Architecture and methodology of transport systems]*. St. Petersburg: Elmor Publ., 2002. (rus)
12. **Belyy O.V.** *Problemy postroyeniya i razvitiya transportnykh sistem [Problems of construction and development of transport systems]*. St. Petersburg: Elmor Publ., 2012. 192 p. (rus)
13. **Morichi S., Acharya S.R. (eds.)** *Transport Development in Asian Megacities, Transportation Research, Economics and Policy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 276 p.
14. **Dubov V.M., Kapustyanskaya T.I., Popov S.A., Sharov A.A.** *Problematika slozhnykh sistem (kontseptualnyye osnovy modelnykh predstavleniy) [Problems of complex systems (conceptual basis of model representations)]*. St. Petersburg: Elmor Publ., 2006, 184 p. (rus)
15. **Rodrigue J.-P., Comtois C., Slack B.** *The Geography of Transport Systems*, 3rd Ed. New York: Routledge, 2013, 416 p.
16. **Safronov E.A.** *Transportnyye sistemy gorodov i regionov [Transport systems of cities and regions]*. Moscow: ASV Publ., 2005, 272 p. (rus)
17. **Kashkina L.V.** *Osnovy gradostroitelstva [Fundamentals of urban planning]*. Moscow: Gumanitar. izd. tsentr VLADOS Publ., 2005, 247 p. (rus)
18. **Te Brömmelstroet M., Bertolini L.** Integrating land use and transport knowledge in strategy-making. *Transportation*, 2010, Vol. 37, Issue 1, Pp. 85–104.
19. **Zito P., Salvo G.** Toward an urban transport sustainability index: an European comparison. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 2011, Vol. 3, Pp. 179–195.
20. **Priester R., Miramontes M., Wulfhorst G.** A generic code of urban mobility: how can cities drive future sustainable development? *Sustainable Mobility in Metropolitan Regions. mobil.TUM. International Scientific Conference on Mobility and Transport. Conference Proceedings. Transportation Research Procedia*, 2014, Vol. 4, Pp. 90–102.
21. **Colonna P., Berloco N., Circella G.** The Interaction between Land Use and Transport Planning: a Methodological Issue. *5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures. Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2012, No. 53, Pp. 84–95.
22. **Fedosov D.V.** Metodika vybora varianta podsistemy svyazi v sistemakh transportnogo monitoring [Method of choice of telecommunication system variant for transport monitoring]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2011, No. 6(138), Pp. 7–12. (rus)
23. **Shkodyrev V.P.** Innovatsionnyye tekhnologii v zadachakh upravleniya bolshimi raspredelennymi sistemami [Innovative technologies in the problems of managing large distribution systems lennymi]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskiye nauki [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physico-mathematical Science]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2012, No. 3(154), Pp. 73–77. (rus)
24. **Gerasimov V.N.** Sistema upravleniya dvizheniyem mobilnogo robota v srede s dinamicheskimi prepyatstviyami [The motion control system of the mobile robot in environment with dynamic obstacles]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii*.

Upravleniye [*St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2013, No. 5(181), Pp. 94–102. (rus)

25. **Nikitin K.V., Benderskaya Ye.N.** Novyy podkhod k primeneniyu rekurrentnykh neyronnykh setey dlya resheniya zadach raspoznavaniya obrazov [A new approach to the use of recurrent neural networks for solving pattern recognition]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU* [*St. Petersburg State Polytechnical University Journal*]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2007, Vol. 2, No. 4, Pp. 85–92. (rus)

26. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy [Methods and algorithms for intellectual analysis of the organization of the transport system]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova* [*Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov*]. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2014, Vol. 2(24), Pp. 92–100. (rus)

27. **Seliverstov Ya.A.** O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentnykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa [On the construction of classification models mezhagentnykh relations of social and economic behavior of the urban population in traffic management systems metropolis]. *Naukovedeniye* [*Internet magazine Naukovedenie*], 2014, No. 5, P. 188. (rus)

28. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A., Starichenkov A.L.** Osobennosti postroyeniya sistemy gorodskogo transportno-logisticheskogo monitoringa [Features of construction of urban transport and logistics monitoring]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [*News SPbGETU «LETI»*]. 2015, No. 1, Pp. 29–36. (rus)

29. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Formalnaya aksiomatika teorii funktsionalnogo subyektiv-

nogo potrebitelskogo povedeniya [Formal axiomatic of subjective «functional» theory of consumer]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskkiye nauki* [*St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(199), Pp. 34–48. (rus)

30. **Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora [Fundamentals of the theory of subjective functionality of rational choice]. *Naukovedeniye* [*Internet magazine Naukovedenie*], 2014, No. 4, P. 90. (rus)

31. **Seliverstov Ya.A., Starichenkov A.N.** Postroyeniye modeley upravleniya gorodskimi transportnymi potokami v usloviyakh neopredelennosti vneshney informatsionnoy sredy [Construction of an Urban Traffic Control Model Under the Conditions of Information Uncertainty]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [*St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 6(210), Pp. 81–94. (rus)

32. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktnogo nepreryvnogo transportnogo protsessa dvizheniya [Fundamentals of the theory of continuous conflict-free movement of the transport process]. *Naukovedeniye* [*Internet magazine Naukovedenie*], 2014, No. 3, P. 122. (rus)

33. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsessa [About logical-algebraic description of the transport logistic process]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [*St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович – научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.

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

E-mail: amuanator@rambler.ru

SELIVERSTOV Sviatoslav A. IPT RAS.

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

E-mail: amuanator@rambler.ru

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

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

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru



SELIVERSTOV Yaroslav A. *IPT RAS.*
199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.
E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 2 (217) – 3 (222) 2015

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 29.06.2015. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,06. Уч.-изд. л. 19,06. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
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. 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