



ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2022
T. 3 № 4

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 3
№ 4**

**Vol. 3
No. 4**

Москва
2022

Учредитель и издатель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

Миссия журнала — развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научно-технологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Члены редакционной коллегии

Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., директор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, председатель Совета, Российский фонд фундаментальных исследований; заведующий кафедрой медицинской

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН — филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Соифер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара

Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва

Петров Игорь Борисович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва

Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Тюмень

Яковлевский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, д. ф.-м. н.

Старков Сергей Олегович, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск

Еськов Валерий Матвеевич, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Лаврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Пятков Сергей Григорьевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Ильин Валерий Павлович, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры прикладной математики, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Крыжановский Борис Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Нагорнов Олег Викторович, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Савченко Владимир Васильевич, PhD (Theoretical Mechanics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Земло Ясунари, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Пападопулос Атанас, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.

Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

Технический редактор

Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент

Переводчик

Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-78857 от 04.08.2020.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 27 июня 2022 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1.

Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

Founder and Publisher

Federal State Institution

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:

- simulation, numerical methods, and simulation software
- electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
- system analysis, control, and information processing.

Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.

The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.

The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

Chief Editor

Prof. *Vladimir B. Betelin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, SRISA, Moscow

Vice Chief Editor

Prof. *Valery A. Galkin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, SRISA, Surgut Branch, Surgut

Editorial Board

Prof. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow

Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),
Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow

Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara
National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara

Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow

Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics,

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information
Technology, SRISA, Moscow

Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov
Moscow State University, Moscow

Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen

Prof. *Mikhail V. Iakobovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied
Mathematics, RAS, Moscow

Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk

Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Branch, Surgut

Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk

Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk

Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research
Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow

Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Prof. *Vladimir V. Savchenko*, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)

Managing Editor

Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)

Technical Editor

Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.

Translator

Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.

Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.

On June 27, 2022 the National Board for Academic Degrees and Titles put the Russian Journal of Cybernetics on the list of leading journals for publishing papers by doctorate students.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovsky pr., 36/1.

Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Академику В. Я. Панченко — 75!	6
В. И. Соколов, А. С. Ахманов, И. О. Горячук, В. Я. Панченко	
Высокоскоростная коммутация сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате	7
В. А. Галкин, А. О. Дубовик	
Моделирование слоистого течения в неограниченном цилиндре с радиусом, изменяющимся во времени	14
Д. В. Горбунов, Т. В. Гавриленко	
Математическое моделирование движений конечности человека с хаотической динамикой	24
С. И. Носков, М. П. Базилевский	
Множественное L_0 -оценивание линейных регрессионных моделей	32
К. И. Бушмелева, А. В. Гавриленко, А. В. Никифоров	
Методология косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах	41
А. В. Мальцев, П. Ю. Тимохин, Е. В. Страшнов	
Моделирование виртуального окружения для пилотируемых миссий по исследованию лунной поверхности	46
Д. А. Быковских, В. А. Галкин	
Об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в трехмерном пространстве	54
Г. Е. Деев, С. В. Ермаков	
Метапереходы вычислительных устройств	65
Е. В. Страшнов, И. Н. Мироненко	
Стабилизация движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения	75
В. А. Галкин, Т. В. Гавриленко, А. Д. Смородинов, О. П. Бобровская	
Применимость алгоритмов роевого интеллекта для решения задач минимизации функций разных классов	84
Л. О. Перетятко	
Единый государственный фонд гидрометеорологических данных как большие данные. Технологии и инструменты для работы с ним	98
Г. В. Газя, Н. Ф. Газя, В. М. Еськов	
Проблема выбора инвариант в биокибернетике с позиций статистики	102
В. В. Еськов, Г. В. Газя, П. Е. Коннов	
Фундаментальные проблемы биокибернетики из-за неустойчивости выборок биосистем	110
А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Е. В. Иванова, М. Н. Романов, В. Г. Сальников	
Развитие электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов	123

CONTENTS

Prof. Vladislav Panchenko, member of the Russian Academy of Sciences, Turns 75	6
V. I. Sokolov, A. S. Akhmanov, I. O. Goryachuk, V. Ya. Panchenko	
High-Speed Signal Switching in a PCB Optical Data Bus	7
V. A. Galkin, A. O. Dubovik	
Simulation of Layered Flow in an Infinite Cylinder with a Time-Varying Radius	14
D. V. Gorbunov, T. V. Gavrilenko	
Simulation of Human Limb Movements with Chaotic Dynamics	24
S. I. Noskov, M. P. Bazilevskiy	
Multiple L_v -estimation of Linear Regression Models	32
K. I. Bushmeleva, A. V. Gavrilenko, A. V. Nikiforov	
Indirect Monitoring of Suspicious Activity on Computer Systems	41
A. V. Maltsev, P. Yu. Timokhin, E. V. Strashnov	
Simulation of Virtual Environment for Crewed Lunar Missions	46
D. A. Bykovskikh, V. A. Galkin	
Adiabatic Compression of Ideal Collisionless Gas in 3d Space	54
G. E. Deev, S. V. Ermakov	
Meta Transitions in Computers	65
E. V. Strashnov, I. N. Mironenko	
Motion Stabilization of Bipedal Walking Robots in Virtual Environment Systems	75
V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko, A. D. Smorodinov, O. P. Bobrovskaya	
Swarm Intelligence Algorithms Applicability for Minimizing Various Functions	84
L. O. Peretyatko	
The National Hydrometeorological Archive as Big Data. Appropriate Technologies and Tools	98
G. V. Gazya, N. F. Gazya, V. M. Eskov	
Statistical Selection of Invariants in Biocybernetics	102
V. V. Eskov, G. V. Gazya, P. E. Konnov	
Fundamental Problems of Biocybernetics Caused by Biosystem Sample Instability	110
A. I. Antonov, Yu. M. Denchik, E. V. Ivanova, M. N. Romanov, V. G. Salnikov	
Asymmetric Mode Simulation for Electric Grid Design	123



Академику В. Я. Панченко — 75!

15 сентября исполнилось 75 лет члену редакционной коллегии академику Владиславу Яковлевичу Панченко. Владислав Яковлевич — это замечательный советский и российский ученый в области лазерно-информационных технологий, научного приборостроения, нелинейной оптики и медицинской физики, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН (2008). На протяжении длительного времени (с 2008 года) он является Председателем совета Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), научным руководителем Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН). С 2006 года — директор института молекулярной физики РНЦ «Курчатовский институт» (параллельно с работой в ИПЛИТ). В 2010 году он стал членом консультативного научного совета фонда «Сколково». В. Я. Панченко руководит кафедрой медицинской физики на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова, где разработал и читает курсы лекций по фундаментальным основам лазерной технологии и медицинской физики.

В 2022 году академик В. Я. Панченко назначен заместителем Председателя ВАК и на состоявшихся в сентябре 2022 года выборах в Академии наук избран вице-президентом РАН и академиком-секретарем отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (ОНИТ РАН). При огромном количестве должностей и гигантской нагрузке Владислав Яковлевич продолжает активную научную работу.

Коллектив редколлегии журнала «Успехи кибернетики» сердечно поздравляет академика В. Я. Панченко с юбилеем и желает нашему замечательному ученому творческого долголетия!

Главный редактор

В. Б. Бетелин

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КОММУТАЦИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ШИНЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

В. И. Соколов^{1,2}, А. С. Ахманов^{1,2,a}, И. О. Горячук¹, В. Я. Панченко¹

¹ *Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

² *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*

^a ✉ asakhmanov@mail.ru

Аннотация: рассмотрены вопросы высокоскоростной коммутации сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. Для создания оптических коммутаторов предлагается использовать каскады волноводных интерферометров Маха–Цендера на основе электрооптических полимеров с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи, способными изменять показатель преломления под действием приложенного электрического поля. Такие коммутаторы обладают высоким быстродействием и обеспечивают частоты переключения на уровне 100 ГГц. Предложен подход к формированию одномодовых волноводов и волноводных интерферометров Маха–Цендера в электрооптических полимерах, основанный на лазерном фотоосветлении хромофоров, которое сопровождается уменьшением показателя преломления полимера под действием излучения видимого диапазона.

Ключевые слова: оптическая шина, полимерные волноводы, световые импульсы, оптоэлектронные печатные платы, высокоскоростная коммутация, электрооптические полимеры.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части создания электрооптических полимеров, а также государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН в части разработки архитектуры оптического интерконнекта с динамической коммутацией каналов.

Для цитирования: Соколов В. И., Ахманов А. С., Горячук И. О., Панченко В. Я. Высокоскоростная коммутация сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):7–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01.

HIGH-SPEED SIGNAL SWITCHING IN A PCB OPTICAL DATA BUS

V. I. Sokolov^{1,2}, A. S. Akhmanov^{1,2,a}, I. O. Goryachuk¹, V. Ya. Panchenko¹

¹ *Federal Research Center for Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

² *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*

^a ✉ asakhmanov@mail.ru

Abstract: the study considers high-speed switching in an optical bus on a printed circuit board (PCB). We proposed to use cascades of Mach–Zehnder waveguide interferometers to build optical switches. The interferometers are made of electro-optical polymers with fluorine-containing chromophores in the side chain. The substance changes its refractive index when an electric field is applied. Such switches are fast: the switching frequency is up to 100 GHz. The authors also proposed an approach to the manufacturing of single-mode waveguides and Mach–Zehnder waveguide interferometers in electro-optical polymer using laser photo-clarification of chromophores. Visible light decreases the refractive index decrease of the polymer.

Keywords: optical bus, polymer waveguides, light pulses, optoelectronic PCB, high-speed switching, electro-optical polymers.

Acknowledgements: this work was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education under a government contract with the Federal Research Center for Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, for the development of electro-optical polymers, and a government contract with the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, for the development of an optical interconnect architecture with dynamic channel switching.

Cite this article: Sokolov V. I., Akhmanov A. S., Goryachuk I. O., Panchenko V. Ya. High-Speed Signal Switching in a PCB Optical Data Bus. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):7–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-01.

Введение

Коммуникационная среда, объединяющая процессоры, память и системы ввода-вывода, является одним из ключевых элементов микропроцессорных вычислительных систем. Коммуникационные среды, основанные на электрических линиях связи, существенно ограничены по быстродействию и параллелизму вследствие физических ограничений, поэтому перспективным является переход на оптические линии передачи данных на всех уровнях иерархии. В работе [1] нами описан подход к решению этой проблемы с использованием массивов полимерных оптических волноводов на печатных платах. Для уменьшения числа каналов (волноводов) их информационная емкость может быть увеличена применением технологии спектрального уплотнения (WDM или DWDM). Разделение оптических каналов в оптической шине на печатной плате в предлагаемой архитектуре может осуществляться на основе технологий мультиплексирования и спектрального разделения каналов.

Архитектура оптического интерконнекта может быть также реализована с использованием топологий с динамической коммутацией каналов. Однако для этого необходимо использовать высокоскоростные коммутаторы оптических сигналов. Работы по созданию таких коммутаторов в настоящее время ведутся во многих ведущих мировых лабораториях, причем одним из наиболее перспективных направлений является использование электрооптических (ЭО) полимеров, показатель преломления которых изменяется под действием приложенного постоянного электрического поля.

Электрооптические полимерные материалы находят широкое применение при создании интегрально-оптических модуляторов с частотой порядка 100 ГГц, высокоскоростных переключателей и маршрутизаторов, работающих в телекоммуникационных диапазонах длин волн вблизи 0,85, 1,3 и 1,55 мкм [2–9]. Для создания таких материалов используются хромофоры, способные изменять показатель преломления под действием приложенного электрического поля. Электрооптический полимер может быть изготовлен либо путем внедрения молекул хромофора в пассивную полимерную матрицу [5–7], либо путем их ковалентного встраивания в боковые цепи полимерных макромолекул [8–10]. Последний подход более перспективен, поскольку препятствует агрегации хромофоров, приводящей к снижению электрооптического коэффициента r_{33} . Важное значение имеет синтез новых электрооптических хромофоров, которые, наряду с большим электрооптическим коэффициентом r_{33} , обладают высокой оптической прозрачностью в ближней ИК-области спектра, особенно в телекоммуникационном С-диапазоне 1530–1565 нм. Повышение прозрачности может быть достигнуто путем использования фторсодержащих хромофоров и полимеров. Это связано с тем, что замена легких атомов водорода на более тяжелые атомы фтора приводит к смещению колебательных полос поглощения в сторону больших длин волн [11]. В результате уменьшается коэффициент затухания света и открываются окна прозрачности в телекоммуникационных областях.

В настоящее время известны различные типы фторсодержащих ЭО полимеров (см., например, обзор [12]). Ниже мы приводим оригинальные результаты по созданию новых видов таких материалов, которые способны к пленкообразованию и могут быть использованы для создания высокоскоростных коммутаторов оптических сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате. Обсуждаются схемы коммутаторов на основе каскадов волноводных интерферометров Маха–Цендера. Предложен подход к формированию одномодовых волноводов, волноводных разветвителей и интерферометров Маха–Цендера в электрооптических полимерах, основанный на лазерном фотоосветлении хромофоров, которое сопровождается уменьшением показателя преломления полимера.

Электрооптические полимеры с ковалентно присоединенными фторсодержащими хромофорами в боковой цепи

Синтезированные электрооптические полимеры с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи представлены на рис. 1 [13, 14]. Данные полимеры способны к пленкообразованию и могут быть использованы для создания высокоскоростных коммутаторов оптических сигналов.

В свеженанесенной световедущей пленке, изготовленной из электрооптического полимера, молекулы хромофоров (диполи) расположены хаотично, поэтому материал является изотропным, см. рис. 2а. Для получения электрооптического эффекта необходимо ориентировать (выстроить) хромофоры в

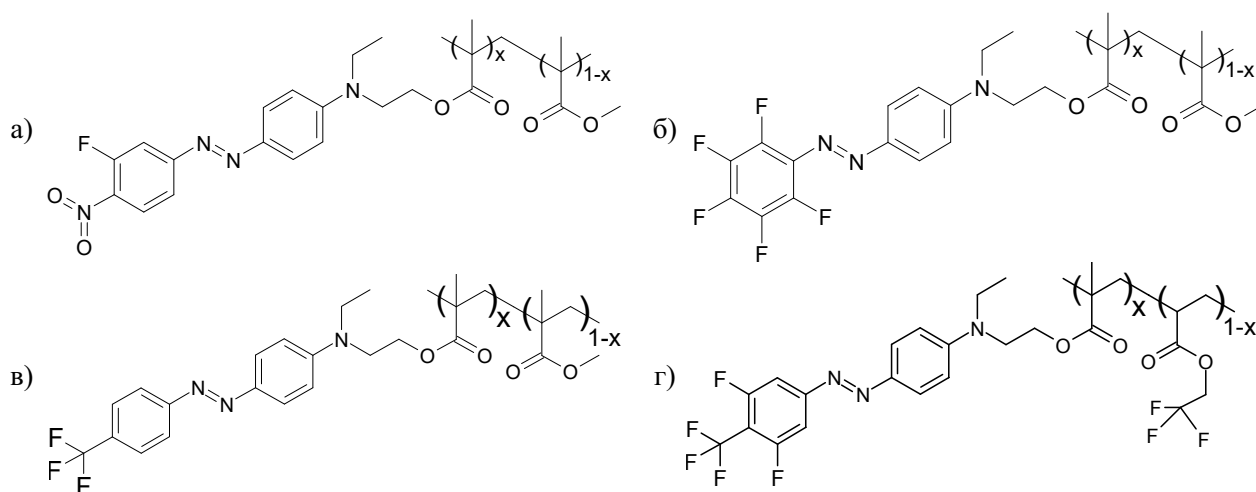


Рис. 1. Электрооптические полимеры с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи. x — молярная концентрация звеньев с хромофорами в макромолекуле полимера

полимерной матрице так, чтобы диполи были направлены перпендикулярно плоскости пленки. Выстраивание хромофоров осуществляется, как правило, в сильном электрическом поле при одновременном нагреве полимера до температуры T , превышающей температуру его стеклования T_g . При $T > T_g$ полимер переходит в вязкотекучее состояние, подвижность хромофорных диполей увеличивается, происходит их разворот и выстраивание вдоль поля, см. рис. 2б. После охлаждения образца до температуры, меньшей температуры стеклования (при сохранении приложенного электрического поля), ориентация диполей в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, «замораживается».

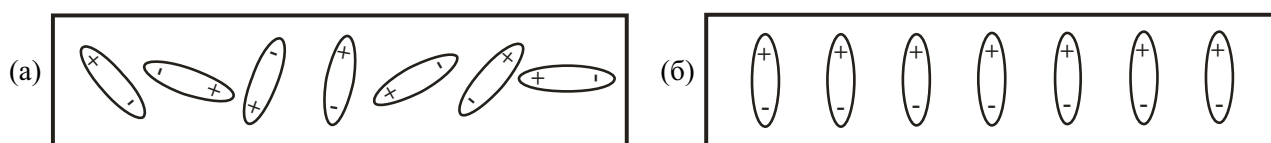


Рис. 2. Ориентация ЭО хромофорных диполей в световедущей полимерной пленке до (а) и после (б) их выстраивания под действием приложенного электрического поля

Лазерное формирование волноводов в ЭО полимерах

Световедущие пленки из ЭО полимеров толщиной 2–4 мкм формировались методом центрифугирования из растворов полимеров в хлорбензоле на кварцевых подложках, а также на кремниевых подложках с термически выращенным оксидным слоем. Спектр поглощения свеженанесенной на подложку SiO_2 пленки иллюстрируется кривой 1 на рис. 3, причем на вставке к этому рисунку показана структура полимера. Видно, что ЭО полимеры имеют интенсивные полосы поглощения с центрами вблизи 429 и 266 нм, обусловленные собственным поглощением света молекулами хромофора.

На рис. 3 приведен также спектр поглощения данной пленки после экспонирования излучением диодного лазера с длиной волны 440 нм, расположенной вблизи пика поглощения хромофора 429 нм. Из сравнения кривых 1 и 2 следует, что в процессе экспонирования интенсивность полос поглощения с центрами вблизи 429 и 266 нм уменьшается, при этом возникают новые полосы поглощения с центрами вблизи 349 и 247 нм. Такое изменение спектра поглощения обусловлено необратимой фотодеструкцией хромофора с потерей окраски (эффект фотоосветления [7, 13, 14]).

Фотодеструкция молекул хромофоров сопровождается изменением их поляризуемости и, как следствие, изменением показателя преломления n полимерного материала. Для определения величины изменения показателя преломления Δn методом центрифугирования на кремниевых подложках с термически выращенным «толстым» оксидным слоем (толщина оксидного слоя 2.1 мкм) были изготовлены световедущие пленки из ЭО полимера. Измерение показателя преломления полимера в процессе фотоосветления осуществлялось методом резонансного возбуждения волноводных мод в пленке на

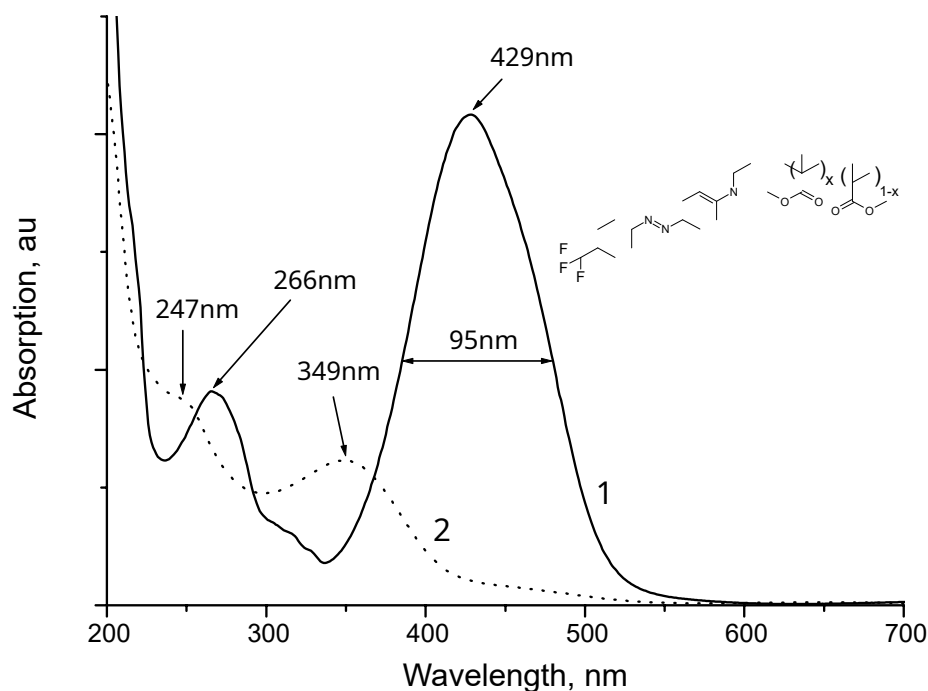


Рис. 3. Спектр поглощения световедущей пленки из ЭО полимера до (1) и после (2) экспонирования лазерным излучением с длиной волны 440 нм. На вставке показана молекулярная структура полимера

длине волны 632.8 нм с использованием призмного устройства связи Metricon2010M. Было установлено, что показатель преломления полимера монотонно уменьшается в процессе фотоосветления, причем уменьшение может достигать $\Delta n = 0.028$ [7, 13, 14]. Такое изменение является достаточным для формирования канальных оптических волноводов с числовой апертурой ЧА = 0.29. Отметим, что под действием актинического лазерного излучения в полимерной пленке образуются области с пониженным показателем преломления, служащие оболочкой волновода, а неэкспонированный электрооптический материал является световедущей жилой, в которой распространяется оптическое излучение (рис. 4).

На рис. 5 приведена фотография массива канальных оптических волноводов, сформированного в пленке из электрооптического полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм.

На рис. 6 представлена фотография волноводного разветвителя, сформированного данным методом в пленке из ЭО полимера. Темные полосы являются световедущими жилами волноводов, обеспечивающих одномодовый режим распространения оптического излучения в телекоммуникационном С-диапазоне 1530–1565 нм.

Таким образом, путем пространственно-селективного лазерного фотоосветления в световедущих пленках из электрооптических полимеров можно изготавливать канальные оптические волноводы, а также другие элементы интегрально-оптических устройств: волноводные разветвители, направленные ответвители и т. д. Этим методом можно, в частности, формировать волноводные интерферометры Маха–Цендера, которые необходимы для создания высокоскоростных интегрально-оптических модуляторов и коммутаторов.

Высокоскоростные оптические модуляторы и коммутаторы на основе каскадов волноводных интерферометров Маха–Цендера

Схема электрооптического модулятора представлена на рис. 7. Модулятор представляет собой интерферометр Маха–Цендера, изготовленный из одномодовых волноводов. Оптическое излучение поступает на вход интерферометра и разделяется в левом волноводном разветвителе в отношении 50 % : 50 % между верхним и нижним плечами интерферометра, имеющими длину L . Сигналы, распространяющиеся в этих плечах, интерферируют на выходе интерферометра и посредством правого

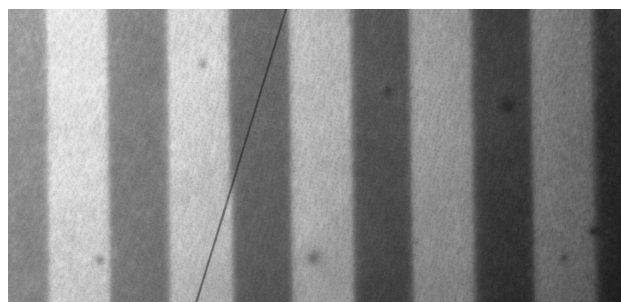
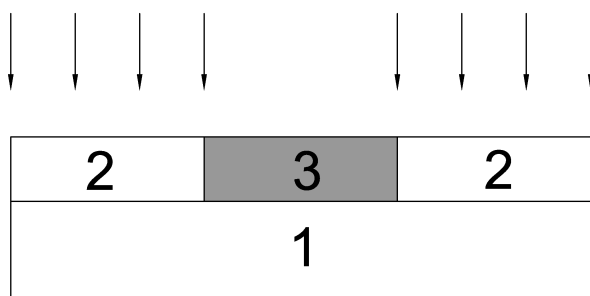


Рис. 4. Схема формирования канальных волноводов в пленке ЭО полимера методом лазерного фотоосветления. 1 — подложка, 2 — осветленные области пленки с более низким показателем преломления (оболочка волновода), 3 — неосветленная область пленки (световедущая жила). Стрелками показан ход актинического лазерного излучения, вызывающего фотоосветление хромофоров

Рис. 5. Фотография массива канальных волноводов, сформированных в пленке из ЭО полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм. Темные полосы с шириной 100 мкм (неосветленные участки) являются световедущими жилами волноводов

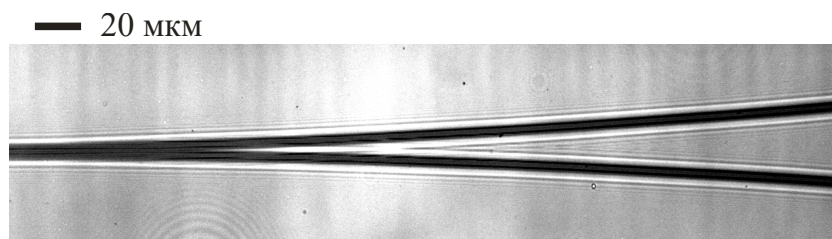


Рис. 6. Фотография волноводного разветвителя, сформированного в пленке из ЭО полимера под действием лазерного излучения с длиной волны 440 нм. Темные полосы шириной 10 мкм (неосветленные участки) являются световедущими жилами волноводов

разветвителя направляются в выходной волновод. Приложение электрического поля к одному из плечей интерферометра (посредством металлического управляющего электрода) приводит к изменению оптической разности хода сигналов, которые могут интерферировать конструктивно (при разности фаз 2π) или деструктивно (если разность фаз π), что приводит к модуляции интенсивности выходного оптического сигнала.

Быстродействие модулятора на основе электрооптических полимеров определяется временем смещения электронного облака от донора к акцептору в хромоформном диполе и составляет согласно современным представлениям менее 1 фс. Практически быстродействие модулятора определяется временем распространения электрического поля по управляющему электроду (см. рис. 7), который в современных устройствах изготавливаются в виде электрода бегущей волны.

На рис. 8 показана схема оптического коммутатора 1×4 на основе каскада из трех волноводных интерферометров Маха–Цендера (MZI). Коммутатор работает следующим образом. Оптический сигнал с длиной волны λ_1 поступает во входной порт первого интерферометра MZI (Вход 1 на рис. 8). Через направленный 3 дБ ответвитель этот сигнал делится в соотношении 50 % : 50 % между плечами этого интерферометра и, в зависимости от вносимой под действием электрического поля разности фаз сигналов в верхнем и нижнем плечах, поступает либо в правый верхний, либо в правый нижний выходной порт этого интерферометра. Аналогичная коммутация оптического сигнала происходит в следующих интерферометрах Маха–Цендера. Таким образом, представленный на рис. 8 волноводный коммутатор позволяет направлять входной оптический сигнал в любой из четырех выходных портов (Выход 1 — Выход 4 на рис. 8).

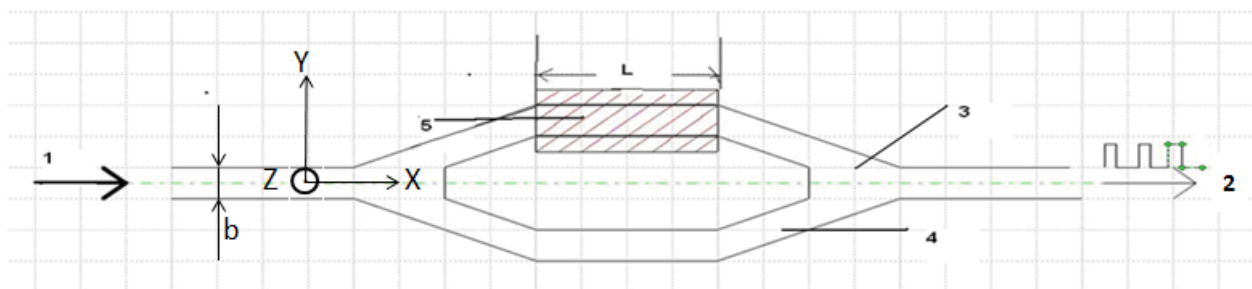


Рис. 7. Схема электрооптического модулятора на основе волноводного интерферометра Маха-Цендера. 1 — непрерывной входной световой сигнал; 2 — модулированный выходной сигнал. Модуляция происходит за счет изменения разности фаз световых волн, распространяющихся в верхнем (3) и нижнем (4) плечах интерферометра при подаче электрического напряжения на управляющий электрод (5) длиной L . X , Y , Z — оси лабораторной декартовой системы координат

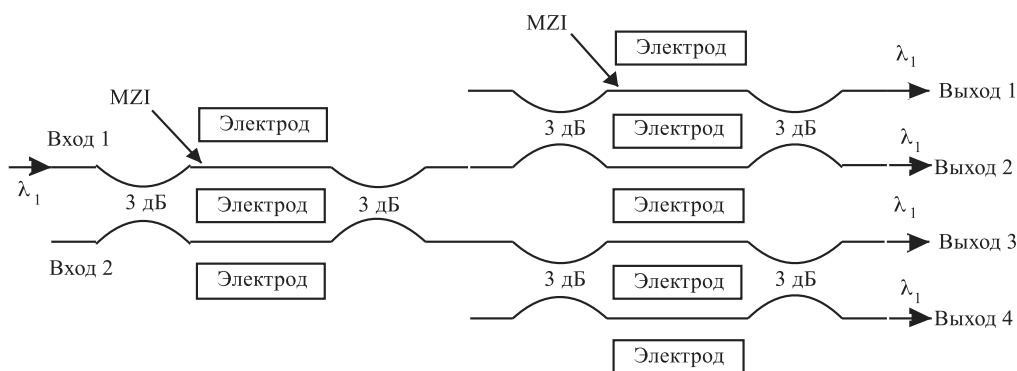


Рис. 8. Схема оптического коммутатора 1×4 на основе каскада из трех волноводных интерферометров Маха-Цендера MZI

Заключение

Синтезированы фторсодержащие электрооптические хромофоры. Разработана методика создания ЭО полимеров с ковалентно присоединенными хромофорами в боковой цепи. Изготовлены световедущие пленки из ЭО полимеров. Показано, что под действием лазерного излучения видимого диапазона происходит фотоосветление полимеров, сопровождающееся уменьшением показателя преломления полимера, что позволяет формировать различные волноводные элементы интегрально-оптических устройств под действием лазерного излучения видимого диапазона. Предложена схема высокоскоростного коммутатора в оптических шинах передачи данных на печатных платах на основе каскадов волноводных интерферометров Маха-Цендера из электрооптических полимеров с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов А. С., Соколов В. И., Панченко В. Я. Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах для микропроцессорных вычислительных систем. *Успехи кибернетики*. 2021;2(2):21–28.
2. Dalton L., Benight S. Theory-Guided Design of Organic Electro-Optic Materials and Devices. *Polymers*. 2011;3:1325.
3. Liu J., Xu G., Liu F., Kityk I., Liu X., Zhen Z. Recent Advances in Polymer Electro-Optic Modulators. *RSC Advances*. 2015;5:1578.
4. Zhang H., Oh M. C., Szep A., Steier W. H., Zhang C., Dalton L. R., Erlig H., Chang Y., Chang D. H., Fetterman H. R. Push-pull Electro-Optic Polymer Modulators with Low Half-Wave Voltage and Low

- Loss at Both 1310 and 1550 nm. *Applied Physics Letters*. 2001;78(20):3136.
5. Zheng C. T., Zhang L. J., Qv L. C., Liang L., Ma C. S., Zhang D. M., Cui Z. C. Nanosecond Polymer Mach-Zehnder Interferometer Electro-Optic Modulator Using Optimized Micro-Strip Line Electrode. *Opt. Quant. Electron.* 2013;45(3):279.
 6. Nazmieva G. N., Vakhonina T. A., Ivanova N. V., Mukhtarov A. Sh., Smirnov N. N., Yakimansky A. V., Balakina M. Yu., Sinyashin O. G. Testing of the Ways for Synthesis of New Nonlinear Optical Epoxy-Based Polymers with Azochromophores in the Side Chain. *European Polymer Journal*. 2015;63:207–216.
 7. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Хайдуков К. В., Назаров М. М. Формирование канальных оптических волноводов в полиметилметакрилате с внедренным электрооптическим хромофором DR13 методом фотоосветления. *Оптика и спектроскопия*. 2017;122(3):128–134.
 8. Michel S., Zyss J., Ledoux-Rak I., Nguyen C. T. High-Performance Electro-Optic Modulators Realized with a Commercial Side-Chain DR1-PMMA Electro-Optic Copolymer. *Proceedings of SPIE. Organic Photonic Materials and Devices XII*. 2010;7599:75990I.
 9. Денисюк И. Ю., Бурункова Ю. Э., Позднякова С. А., Баля В. К., Жук Д. И., Фокина М. И. Полимерный электрооптический модулятор для радиофотоники. *Оптика и спектроскопия*. 2015;119(4):691.
 10. Соколов В. И., Ахманов А. С., Василенко Е. С., Горячук И. О., Молчанова С. И., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В. Синтез и исследование оптических свойств фторсодержащего хромофора дисперсный оранжевый DO1. *Fluorine Notes*. 2018;5(120):1–2.
 11. Groh W. Overtone Absorption in Macromolecules for Polymer Optical Fibers. *Makromol. Chem.* 1988;189:2861–2874.
 12. Liu J., Xu G., Liu F., Kityk I., Liu X., Zhen Z. Recent Advances in Polymer Electro-Optic Modulators. *RSC Advances*. 2015;5:15784–15794.
 13. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Молчанова С. И., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В., Хайдуков К. В. Фторсодержащие акриловые полимеры с фторсодержащими электрооптическими хромофорами в боковой цепи. *Fluorine notes*. 2020;2(129):1–2.
 14. Соколов В. И., Ахманов А. С., Ашарчук И. М., Горячук И. О., Заварзин И. В., Погодина Ю. Е., Полунин Е. В. Лазерное формирование световодов в электрооптических полимерах с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи. *Fluorine Notes*. 2018;6(121):5–6.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-02

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОИСТОГО ТЕЧЕНИЯ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ЦИЛИНДРЕ С РАДИУСОМ, ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВО ВРЕМЕНИ**В. А. Галкин^а, А. О. Дубовик^б***Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация**Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4158-9646>, alldubovik@gmail.com

Аннотация: рассматривается система уравнений магнитной гидродинамики, описывающая течение вязкой проводящей жидкости в области, изменяющейся во времени. На границе области течения выполняется условие прилипания. Исследование данного класса задач связано с задачами управления параметрами несжимаемой жидкости за счет воздействий различных типов, например, с помощью объемного воздействия магнитным полем и движения границы области течения. В рамках модели слоистого течения жидкости получен класс точных решений уравнений магнитной гидродинамики в бесконечном цилиндре с радиусом, изменяющимся во времени. Результаты расчетов получены на основе метода контрольных объемов с полностью неявной схемой по времени. Разностный аналог дифференциальных уравнений имеет второй порядок точности по пространственной переменной и первый порядок точности по времени. Найденные точные решения использованы для верификации результатов расчетов численного моделирования и показали их совпадение в пределах точности используемых разностных аппроксимаций. Результаты расчетов показали устойчивость на серии проведенных испытаний с уменьшающимся шагом сетки.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, точные решения, переменная область течения.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № FNEF-2022-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления», рег. № 1021060909180-7-1.2.1.

Для цитирования: Галкин В. А., Дубовик А. О. Моделирование слоистого течения в неограниченном цилиндре с радиусом, изменяющимся во времени. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):14–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-02.

SIMULATION OF LAYERED FLOW IN AN INFINITE CYLINDER WITH A TIME-VARYING RADIUS**V. A. Galkin^а, A. O. Dubovik^б***Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation**Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4158-9646>, alldubovik@gmail.com

Abstract: we considered a system of magnetohydrodynamic equations which describes a viscous conducting fluid flow in a time-varying domain. The no-slip condition is satisfied at the boundary of the flow domain. The study of such problems is relevant to controlling the incompressible fluid properties by various means such as a volumetric application of a magnetic field, or the flow domain boundary shift. Within the layered fluid flow model, we obtained a class of exact solutions of the magnetohydrodynamic equations for an infinite cylinder with a time-varying radius. The calculation used the control volume approach with a completely implicit time-dependent scheme. The difference analog of differential equations has the second order of accuracy for its spatial variable and the first order of accuracy for time. The exact solutions we found were used to verify the results of the numerical simulation. They match the accuracy of

the difference approximations. The calculation results are stable in a series of tests with a decreasing grid spacing.

Keywords: magnetohydrodynamics, exact solutions, variable flow domain.

Acknowledgements: this study is a part of the government contract 47 GP with the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. FNEF-2022-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods, reg. No. 1021060909180-7-1.2.1.

Cite this article: Galkin V. A., Dubovik A. O. Simulation of Layered Flow in an Infinite Cylinder with a Time-Varying Radius. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):14–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-02.

Введение

В рамках модели магнитной гидродинамики (МГД) рассматривается течение вязкой проводящей жидкости в области, изменяющейся во времени. Исследование данного класса задач связано с задачами управления параметрами несжимаемой жидкости. Например, в качестве управляющих воздействий могут рассматриваться изменение границы области течения или объемное воздействие магнитным полем. Постановка такой задачи представлена в [1].

Данная статья является продолжением серии публикаций авторов, посвященных исследованию точных решений уравнений гидродинамики, магнитной гидродинамики в переменных во времени областях [1–3]. В данной работе в рамках модели МГД получен класс точных решений, описывающий слоистое течение жидкости в бесконечном цилиндре с радиусом, изменяющимся во времени. Задача о слоистом течении вязкой проводящей жидкости в бесконечном цилиндре фиксированного радиуса исследовалась авторами в [4].

Большинство современных исследований течений жидкости в областях, изменяющихся во времени, касается исключительно вопросов численного моделирования [5–9], в то время как теоретическим исследованиям уделяется крайне мало внимания. Исследование точных решений задач гидродинамики или магнитной гидродинамики важно не только для разработки серий тестовых задач для верификации результатов вычислительных экспериментов, но и для качественного анализа рассматриваемых в этих задачах процессов и явлений. Среди теоретических результатов в этой области отметим работу [10]. В ней рассматривается течение вязкой жидкости в цилиндрической области с меняющимся радиусом и представлен осесимметричный класс точных решений уравнений гидродинамики в трубе с линейной зависимостью части компонент скорости от одной пространственной переменной, полученный методом функции тока.

Математическая модель

Система уравнений МГД [11–13], описывающая течение вязкой несжимаемой проводящей жидкости в цилиндрической системе координат в открытой пространственной области $\{\rho, \varphi, z\} \in D(t)$, $t > 0$, имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_\rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) H_\rho = (\mathbf{H} \cdot \nabla) v_\rho + \mu_m \left(\Delta H_\rho - \frac{H_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) H_\varphi + \frac{v_\varphi H_\rho}{\rho} = (\mathbf{H} \cdot \nabla) v_\varphi + \frac{v_\rho H_\varphi}{\rho} + \mu_m \left(\Delta H_\varphi - \frac{H_\varphi}{\rho^2} + \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial H_\rho}{\partial \varphi} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) H_z = (\mathbf{H} \cdot \nabla) v_z + \mu_m \Delta H_z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_\rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_\rho - \frac{v_\varphi^2}{\rho} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(P + \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho_0} (\mathbf{H} \cdot \nabla) H_\rho - \frac{H_\varphi^2}{4\pi\rho_0\rho} + \mu \left(\Delta v_\rho - \frac{v_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_\varphi + \frac{v_\varphi v_\rho}{\rho} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(P + \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho_0} (\mathbf{H} \cdot \nabla) H_\varphi + \frac{H_\varphi H_\rho}{4\pi\rho_0\rho} + \mu \left(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{\rho^2} + \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial v_\rho}{\partial \varphi} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) v_z = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(P + \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi\rho_0} (\mathbf{H} \cdot \nabla) H_z + \mu \Delta v_z, \quad (7)$$

$$\rho_0 c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right) = \varepsilon \Delta T + \varsigma \left\{ 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_\rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\rho}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{\rho} \right)^2 \right\} + \frac{\mu_m}{4\pi} (\text{rot } \mathbf{H})^2, \quad (8)$$

где $\mathbf{H} \equiv \{H_\rho, H_\varphi, H_z\}$ — вектор напряженности магнитного поля, $\mathbf{v} \equiv \{v_\rho, v_\varphi, v_z\}$ — вектор скорости жидкости, t — время, μ_m — магнитная вязкость жидкости, ρ_0 — плотность жидкости, P — давление, μ — кинематическая вязкость жидкости, c_p — теплоемкость при постоянном давлении, ε — теплопроводность, ς — динамическая вязкость, T — температура жидкости, $\chi = \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_p}$ — коэффициент температуропроводности, используемый далее. Операторы $\text{div } \mathbf{F}$, $(\mathbf{v} \cdot \nabla) f$, Δf , $(\text{rot } \mathbf{H})^2$ определяются следующими выражениями:

$$\text{div } \mathbf{F} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho F_\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}, \quad (\mathbf{v} \cdot \nabla) f = v_\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} + \frac{v_\varphi}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial f}{\partial z},$$

$$\Delta f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2},$$

$$(\text{rot } \mathbf{H})^2 = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho H_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \varphi} \right)^2.$$

Отметим, что в рамках данной модели решение уравнения энергии (8) не составляет труда при известных полях скорости и напряженности магнитного поля и рассматривается отдельно после их нахождения. Область течения $D(t)$ предполагается изменяющейся во времени. В качестве граничных условий для вектора скорости рассматривается условие прилипания, для вектора напряженности магнитного поля — условие Дирихле, для поля температуры — условие теплонепроницаемости стенок.

Пусть область $\bar{D}(t)$ — бесконечный цилиндр $\rho \in [0; R(t)]$, $R(t) > 0$, $\varphi \in [0; 2\pi]$, $z \in (-\infty; +\infty)$ с осью, параллельной Oz , $R(t)$ — радиус цилиндра. Рассмотрим слоистое течение жидкости, при котором вектор скорости жидкости имеет вид $\mathbf{v} \equiv \{0, v_\varphi(\rho, t), v_z(\rho, t)\}$. Предположим, что магнитное поле параллельно оси цилиндра, т. е. $\mathbf{H} \equiv \{0, 0, H_z(\rho, t)\}$ и, кроме того, $P \equiv p(\rho, t)$, $T \equiv T(\rho, t)$.

В рамках модели слоистого течения жидкости предполагается, что $v_\rho \equiv 0$ в $D(t)$, но в таком случае для удовлетворения граничного условия прилипания на границе цилиндра необходимо потребовать выполнения

$$v_\rho|_{\rho=R(t)} = R'(t),$$

т. е. радиальная компонента скорости течения на границе области терпит разрыв. Далее будет показано, что $R(t) \sim \sqrt{t}$. Тогда $v_\rho(\rho, t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, т. е. асимптотически функция v_ρ непрерывно равна нулю в области течения. Рассматриваемый здесь случай известен как отрывное течение, при котором происходит как бы «отрыв» течения в пограничном слое и линии тока перемещаются в глубь области течения [14, 15]. В рамках рассматриваемой модели слоистого течения жидкости это перемещение происходит за счет увеличения радиуса цилиндра $D(t)$, при этом линии тока сохраняют слоистую структуру течения.

Результаты теоретического исследования

В [4] показано, что в рамках модели слоистого течения жидкости, с учетом сделанных предположений, решение системы уравнений (1) – (8) равносильно решению более простой системы уравнений:

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \mu_m \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \right), \quad (9)$$

$$\frac{v_\varphi^2}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial \rho} + \frac{1}{4\pi\rho_0} H_z \frac{\partial H_z}{\partial \rho}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = \mu \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial v_\varphi}{\partial \rho} \right) \right) - \mu \frac{v_\varphi}{\rho^2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = \mu \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right) \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{\mu_m}{4\pi\rho_0 c_p} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right)^2 + \frac{\mu}{c_p} \left\{ \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial \rho} - \frac{v_\varphi}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right)^2 \right\}. \quad (13)$$

Каждое из уравнений (9)–(13) может быть решено отдельно, при этом поле давления из уравнения (10) и поле температуры из уравнения (13) находятся после определения всех компонент вектора скорости и напряженности магнитного поля из уравнений (9), (11), (12). Граничные и начальные условия системы (9) – (13) имеют вид:

$$v_z|_{\rho=R(t)} = 0, \quad v_z|_{t=0} = v_{z,0}(\rho), \quad (14)$$

$$v_\varphi|_{\rho=R(t)} = 0, \quad v_\varphi|_{t=0} = v_{\varphi,0}(\rho), \quad (15)$$

$$H_z|_{\rho=R(t)} = h_z(t), \quad H_z|_{t=0} = H_{z,0}(\rho), \quad (16)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_{\rho=R(t)} = 0, \quad T|_{t=0} = 0. \quad (17)$$

Рассмотрим подробно решение уравнения (12) с граничным и начальным условием (14). Преобразуем выражение (12), положив $\rho/\sqrt{\mu}$ за новую переменную, обозначив ее также ρ . Получим

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right) \right). \quad (18)$$

Сделаем замену переменных в уравнении (18) $\{\rho, t\} \rightarrow \{y, t\}$, $y = g(\rho, t)$. Функцию g выберем таким образом, чтобы 1) переменные в уравнении (12) разделялись и 2) граничное условие в (14), рассматриваемое при $\rho = R(t)$, переходило в граничное условие, рассматриваемое при $y = \text{const}$. Для выполнения этих условий достаточно положить $y = \rho/R(t)$, $R(t) = \sqrt{At + B}$, A, B — некоторые константы. В новых переменных задача (18), (14) имеет вид:

$$R^2(t) \frac{\partial u}{\partial t} - \gamma y \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right), \quad u|_{y=1} = 0, \quad u|_{t=0} = u_0(y), \quad (19)$$

где $y \in [0; 1]$, $u(y, t) \stackrel{\text{def}}{=} v_z(\rho, t)$, $\gamma = R'(t)/R(t)$, $u_0(y) = v_{z,0}(yR(0))$. Задача (19) является представлением задачи (12), (14) в лагранжевой системе координат.

Положим $u(t, y) = T(t)\theta(y)$, $R^2(t)T'/T = \lambda$, где собственные значения λ находятся из решения следующей задачи:

$$\lambda\theta - \left(\gamma y + \frac{1}{y} \right) \theta' = \theta'', \quad \theta(1) = 0, \quad \theta(0) < \infty. \quad (20)$$

Представим задачу (20) в эквивалентном виде, положив

$$\eta(y) = \sqrt{y} e^{\frac{\gamma y^2}{4}} \theta(y). \quad (21)$$

Получим следующую задачу:

$$-\lambda\eta = L\eta \equiv -\eta'' + \left(\frac{\gamma^2}{4} y^2 + \gamma - \frac{1}{4y^2} \right) \eta, \quad \eta(1) = 0, \quad \eta(0) = O(\sqrt{y})|_{y \rightarrow 0}. \quad (22)$$

Рассмотрим дифференциальный оператор L задачи (22). Областью определения этого оператора является подмножество гильбертова пространства H , состоящее из функций, дважды непрерывно дифференцируемых на отрезке $[0; 1]$ и удовлетворяющих граничным условиям из (22). Непосредственно из (22) с учетом граничных условий видно, что оператор L симметричен, кроме того, оператор L положительный. Чтобы показать отрицательность собственных значений λ (т. е. $-\lambda$ положительны), достаточно преобразовать задачу (20) к эквивалентному виду, положив

$$\omega(y) = e^{\frac{\gamma y^2}{2}} \theta(y).$$

Задача (20) примет вид:

$$-\varepsilon \omega y e^{-\gamma \frac{y^2}{2}} = - \left(y e^{-\gamma \frac{y^2}{2}} \omega' \right)', \quad \omega(1) = 0, \quad \omega(0) < \infty,$$

где $\varepsilon = \lambda + 2\gamma$. Из последнего представления непосредственно следует отрицательность собственных значений ε , а, следовательно, и λ при $\gamma > 0$.

Задача (22) является задачей Штурма–Лиувилля [16, 17]. От рассмотренной в [17] задачи Штурма–Лиувилля задача (22) отличается граничным условием в точке $y = 0$ и отсутствием свойства положительности u функции:

$$q(y) \equiv \frac{\gamma^2}{4} y^2 + \gamma - \frac{1}{4y^2}.$$

Однако, как показано ранее, условие $q(y) \geq 0$ не является необходимым для положительности оператора L . Таким образом, все свойства задачи Штурма–Лиувилля, рассмотренные в [17], [18], присущи и задаче (22), т. е. система собственных функций $\{\eta_n\}$ и собственных значений $\{\lambda_n\}$ обладает следующими свойствами:

1. Множество собственных значений не пусто и не имеет конечных предельных точек.
2. Собственные значения вещественные и конечной кратности, спектр задачи простой.
3. Собственные функции можно выбрать вещественными и ортонормальными так, что $\eta_n \in C^2([0; 1])$.
4. Собственные значения отрицательны.
5. Множество собственных значений счетно.
6. Справедлива теорема В. А. Стеклова, согласно которой всякая функция из области определения оператора L разлагается в регулярно сходящийся ряд Фурье по собственным функциям задачи Штурма–Лиувилля.
7. Система собственных функций задачи Штурма–Лиувилля полна в $H([0; 1])$.

Учитывая (21), решение задачи (22) можно выразить через решение задачи (20), которое будем искать в виде степенного ряда

$$\theta(y) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k y^k.$$

Задача (20) имеет следующее решение:

$$\theta_n(y) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j y^{2j}, \quad a_0 \in R, \quad a_1 = a_0 \frac{\lambda_n}{4}, \quad a_j = a_{j-1} \frac{\lambda_n - 2\gamma(j-1)}{4j^2} \quad \text{при } j \geq 2. \quad (23)$$

Собственные функции известны с точностью до произвольного множителя a_0 . Собственные значения определяются из решения задачи $\theta_n(1) = 0$. Ряд (23) сходится равномерно по переменной $y \in [0; 1]$ и по $\lambda \in (-\infty; +\infty)$, что можно показать, воспользовавшись признаком Даламбера. Из вида собственных функций (23) следует, что уравнение (20) также удовлетворяется в точке $y=0$.

Решение задачи (19) имеет вид:

$$u(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n (At + B)^{\lambda_n/A} \theta_n(y), \quad c_n = \frac{B^{-\lambda_n/A}}{\|\eta_n\|^2} \int_0^1 u_0(y) y \exp \left\{ \gamma y^2 / 2 \right\} \theta_n(y) dy, \quad (24)$$

$$\|\eta_n\| = \left(\int_0^1 y \exp \left\{ \gamma y^2 / 2 \right\} \theta_n^2(y) dy \right)^{1/2}.$$

Выполняя обратную замену, получаем решение задачи (12), (14):

$$v_z(\rho, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n (At + B)^{\lambda_n/A} \theta_n(\rho / (\sqrt{\mu} R(t))). \quad (25)$$

Задача (9), (16) отличается от ранее рассмотренной задачи (12), (14) лишь неоднородным граничным условием на правом конце и присутствием магнитной вязкости вместо кинематической. Решение задачи (9), (16) можно получить, используя редукцию и соотношения (25). Ее решение имеет вид:

$$H_z(\rho, t) = \frac{\rho}{R(t)} h_z(t) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n (At + B)^{\lambda_n/A} \theta_n(\rho / (\sqrt{\mu_m} R(t))) + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} d_n(t) (At + B)^{\lambda_n/A} \theta_n(\rho / (\sqrt{\mu_m} R(t))), \\ d_n(t) = \frac{1}{\|\eta_n\|^2} \int_0^t \int_0^1 y \exp\left(\gamma y^2/2\right) \theta_n(y) g(y, t) dy (A\tau + B)^{-1-\lambda_n/A} d\tau, \\ g(y, t) = \sqrt{\mu_m} \left(\frac{h_z(t)}{y} - y R^2(t) h'_z(t) + \gamma y h_z(t) \right),$$

где c_n , так же как и в (24), — коэффициенты Фурье разложения начального условия, получаемого после замены переменных в (16), по системе собственных функций задачи (20), $\|\eta_n\|$ те же, что и в (24), а $n \in N$.

С задачей (11), (15) можно провести аналогичные преобразования, что и при решении задачи (9), (16):

$$R^2(t) \frac{\partial u}{\partial t} - \gamma y \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) - \frac{u}{y^2}, \quad u|_{y=1} = 0, \quad u|_{t=0} = u_0(y).$$

Здесь $u(y, t) \stackrel{\text{def}}{=} v_\varphi(\rho, t)$, $u_0(y) = v_{\varphi,0}(yR(0))$. Далее получаем так же задачу Штурма–Лиувилля, обладающую уже другими собственными значениями и собственными функциями, но для которой справедливы свойства 1–7. Задача Штурма–Лиувилля в случае (11), (15), сохраняя прежние обозначения, имеет вид:

$$-\lambda\eta = -\eta'' + \left(\frac{\gamma^2}{4} y^2 + \gamma - \frac{3}{4y^2} \right) \eta, \quad \eta(1) = 0, \quad \eta(0) = O(\sqrt{y})|_{y \rightarrow 0}.$$

Решение этой задачи, учитывая (21), найдем среди решений следующей задачи:

$$\lambda\theta - \left(\gamma y + \frac{1}{y} \right) \theta' + \frac{\theta}{y^2} = \theta'', \quad \theta(1) = 0, \quad \theta(0) < \infty. \quad (26)$$

Для задачи (26) имеем:

$$\theta_n(y) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j y^{2j-1}, \quad a_1 \in R, \quad a_j = a_{j-1} \frac{\lambda_n - \gamma(2j-1)}{4j(j-1)} \quad \text{при } j \geq 2. \quad (27)$$

Собственные значения определяются так же из решения задачи $\theta_n(1) = 0$. Решение задачи (11), (15) имеет такой же вид, как и (25), с той лишь разницей, что коэффициенты c_n и $\|\eta_n\|$, $n \in N$ в (25) определяются с учетом (27), а начальное условие следует брать из (15). Из (27) следует, что уравнение (26) удовлетворяется также в точке $y=0$.

Преобразуем уравнение энергии (13). Введем новые переменные, сохранив старые обозначения ρ , H_z , v_z , v_φ :

$$\frac{\rho}{\sqrt{\chi}}, \quad \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_0 c_p \chi}} H_z, \quad \sqrt{\frac{\mu}{c_p \chi}} v_z, \quad \sqrt{\frac{\mu}{c_p \chi}} v_\varphi.$$

Задача (13), (17) имеет тот же вид, что и задача (9), (16), изменяется лишь тип граничного условия на правом конце, и решается аналогично:

$$R^2(t) \frac{\partial u}{\partial t} - \gamma y \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right), \quad \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=1} = 0, \quad u|_{t=0} = u_0(y).$$

Для нее так же рассматриваются аналоги выражений (20)–(22):

$$\lambda\theta - \left(\gamma y + \frac{1}{y}\right)\theta' = \theta'', \quad \theta'(1) = 0, \quad \theta(0) < \infty. \quad (28)$$

Используя (21), задачу (28) можно представить в эквивалентном виде:

$$-\lambda\eta = -\eta'' + \left(\frac{\gamma^2}{4}y^2 + \gamma - \frac{1}{4y^2}\right)\eta, \quad 2\eta'(1) - (1 + \gamma)\eta(1) = 0, \quad \eta(0) = O(\sqrt{y})|_{y \rightarrow 0}.$$

Справедливы свойства 1–7 задачи Штурма–Лиувилля, а ее решение имеет вид (23), где, однако, собственные значения определяются не из условия $\theta_n(1) = 0$, а из условия $\theta'_n(1) = 0$. Ряд для $\theta'_n(1)$, получаемый из (23) почленным дифференцированием, так же сходится равномерно по $\lambda \in (-\infty; +\infty)$, что можно показать, используя признак Даламбера. С учетом последнего, решение (13), (17) имеет вид:

$$T(\rho, t) = \sum_{n=1}^{\infty} d_n(t) (At + B)^{\lambda_n/A} \theta_n(\rho / (\sqrt{\chi} R(t))),$$

$$d_n(t) = \frac{1}{\|\eta_n\|^2} \int_0^t \int_0^1 y \exp\left(\gamma y^2 / 2\right) \theta_n(y) g(y, t) dy (A\tau + B)^{-1-\lambda_n/A} d\tau, \quad (29)$$

$$g(y, t) = \left(\frac{\partial H_z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial y} - \frac{v_\varphi}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2.$$

Использовать аналитические выражения в виде рядов для $v_z(\rho, t)$, $H_z(\rho, t)$, $v_\varphi(\rho, t)$ для представления (29) нельзя, поскольку для них сумма производных членов ряда не сходится к производной сумме. Например, функция $u(y, 0) = \sin y$ может быть разложена в ряд (24) при $t = 0$, который, как показано ранее, сходится равномерно. Но в таком случае из (23) следует, что для всех собственных функций $\theta'_n(0) = 0$ и, следовательно, сумма производных членов ряда равна нулю при $y = 0$, в то время как $u'(y, 0)|_{y=0} = 1$.

Результаты расчетов

Для вычисления собственных значений и собственных функций задачи использовалась библиотека «длинной арифметики» GMP [19]. На рис. 1. представлены графики функций $S(\lambda)$ (в случае задачи (20) $S(\lambda) \equiv \theta(1)$), нули которых являются собственными значениями для задач (20), (26), (28) для компонент v_z и H_z , v_φ , T соответственно.

Собственные значения быстро возрастают по модулю, и находить нули $S(\lambda)$, используя стандартные типы данных, имеющие двойную точность, не представляется возможным. Для нахождения собственных значений ряд $S(\lambda)$ ограничивался 300 членами, если взять еще 50 членов, то корни ряда $S(\lambda)$ не изменятся в пределах первых значащих 16 чисел после запятой. Всего было вычислено по 60 собственных значений и собственных функций в каждой из задач. Этого количества оказалось достаточным для получения разложения в ряд Фурье, например для задачи (20), с точностью порядка 10^{-4} . Для представления чисел с плавающей запятой использовалось 32 байта. Графики собственных функций для задачи (20) представлены на рис. 2.

Решение задачи (18) для нахождения v_z , как и аналогичных задач для нахождения H_z , v_φ , T , выполнено методом контрольных объемов [20] с полностью неявной схемой по времени и центрально-разностной аппроксимацией по пространственной переменной. После приведения подобных слагаемых в дискретном аналоге полученная система линейных алгебраических уравнений на каждом шаге по времени решалась методом Гаусса–Зейделя.

Численные результаты, представленные ниже, получены при условии, что шаг по пространственной переменной y составляет $h=0.01$, по времени $t - \Delta t=0.0001$. Вычислительная устойчивость алгоритма контролировалась проведением расчетов на сетках с последовательным уменьшением шагов. Вычисления показывают, что результаты расчетов соответствуют второму порядку аппроксимации относительно шага сетки по пространственной переменной.

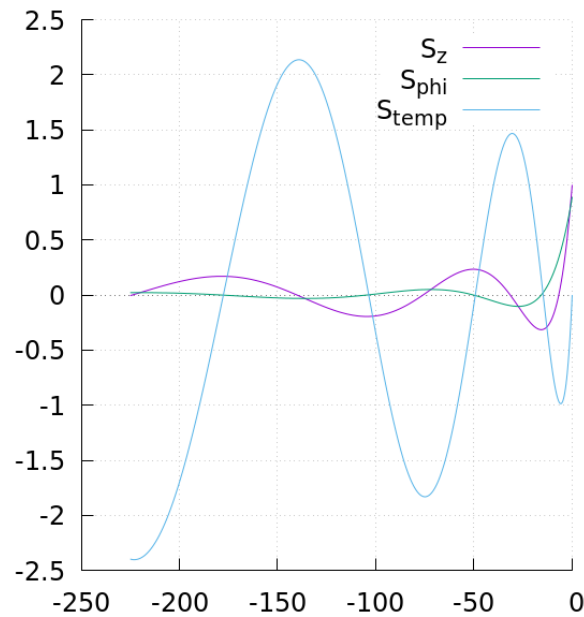


Рис. 1. Графики функций, нули которых являются собственными значениями для задач (20), (26), (28)

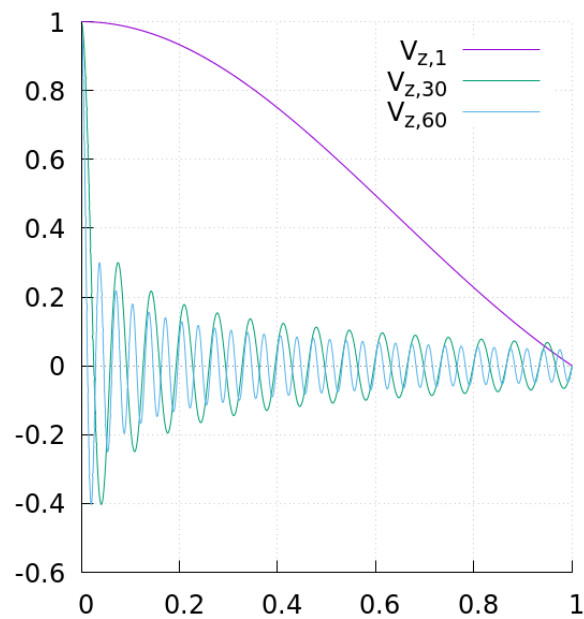


Рис. 2. Графики собственных функций, соответствующие различным собственным значениям задачи (20)

Тестовые расчеты проведены в случае, когда все параметры жидкости полагались равными единице, $l(t) = \sqrt{2t+1}$. Функции в (14)–(17), определяющие начальные и граничные условия, имеют вид:

$$v_{z,0} = \sin \pi \rho, \quad v_{\varphi,0} = \rho(\rho-1) \cdot 10^4,$$

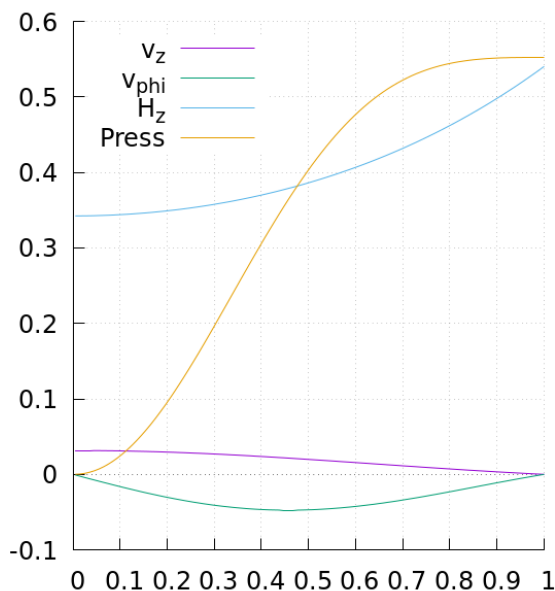
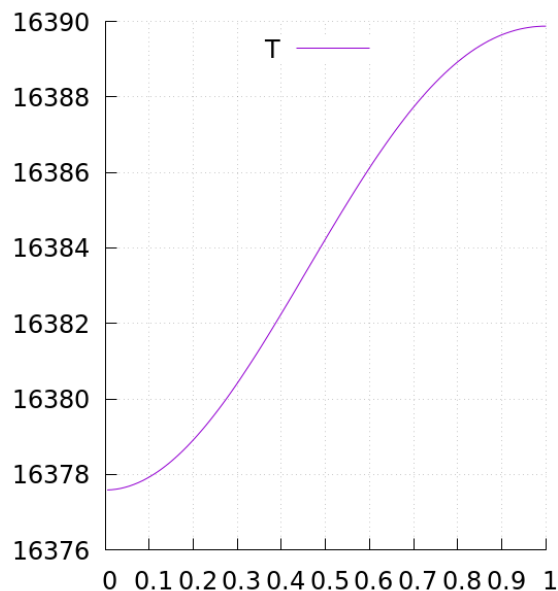
$$H_z(t) = e^{t-1} \cos 1, \quad H_{z,0} = e^{-1} \cos \rho.$$

Результаты оценки погрешности численного решения задачи в сравнении с их аналитическим решением в условный момент времени $t=1$ представлены в табл. Графики компонент вектора скорости, вектора напряженности магнитного поля, поля давления и поля температуры при $t=1$ представлены на рис. 3–4.

Таблица

Оценка погрешности расчетов в сравнении с аналитическим решением

Величина	$\max_{x_2} f_{num} - f_{an} $	$\max_{x_2} f_{num} - f_{an} / f_{an} \cdot 100\%$
v_z	$4 \cdot 10^{-5}$	0.12
v_φ	$3 \cdot 10^{-4}$	0.5
H_z	$7 \cdot 10^{-4}$	0.2

Рис. 3. Графики v_z , v_φ , H_z , P при $t = 1$ Рис. 4. График T при $t = 1$

Рисунки 3, 4 иллюстрируют тепловыделение в течении вязкой проводящей жидкости в результате объемного воздействия магнитным полем и движения границы области течения.

Заключение

Таким образом, для рассмотренного класса задач построен единообразный вычислительный алгоритм, позволяющий для слоистого течения жидкости рассчитать как поле скоростей течения, вектор напряженности магнитного поля, поле давления, так и поле температуры. Проведенные расчеты позволяют утверждать, что метод контрольных объемов верифицирован на основе сравнения найденного точного решения с численным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Задачи управления параметрами несжимаемой жидкости при изменении во времени геометрии течения. *ДАН*. 2015;463(2):149–151. DOI: 10.7868/S0869565215200037.
2. Галкин В. А., Дубовик А. О. О моделировании слоистого течения вязкой проводящей жидкости в области, изменяющейся во времени. *Матем. моделирование*. 2020;32(4):31–42. DOI: 10.20948/mm-2020-04-03.
3. Галкин В. А., Дубовик А. О. Моделирование трехмерного потенциального течения жидкости в области, изменяющейся во времени. *ЖВМ и МФ*. 2022;62(7):1180–1186. DOI: 10.31857/S0044466922050052.
4. Галкин В. А., Дубовик А. О. О моделировании слоистого течения вязкой несжимаемой жидкости во вращающейся трубе. *Вестник кибернетики*. 2017;2(26):58–65.
5. Antuono M., Sun P. N., Marrone S., Colagrossi A. The δ -ALE-SPH Model: an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Framework for the δ -SPH Model with Particle Shifting Technique. *Computer & Fluids*. 2020;104806. DOI: 10.1016/j.compfluid.2020.104806.

6. Mohammed A. and others. CFD and Statistical Approach to Optimize the Average Air Velocity and Air Volume Fraction in an Inert-Particles Spouted-Bed Reactor (IPSBR) System. *Heliyon*. 2021;7(3):E06369. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06369.
7. Ren X., Xu K., Shyy W. A Multi-Dimensional High-Order DG-ALE Method Based on Gas-Kinetic Theory with Application to Oscillating Bodies. *Journal of Computational Physics*. 2016;316:700–720. DOI: 10.1016/j.jcp.2016.04.028.
8. Elgeti S., Sauerland H. Deforming Fluid Domains within the Finite Element Method: Five Mesh Based Tracking Methods in Comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2016;23:323–361. DOI: 10.1007/s11831-015-9143-2.
9. Бугаго Н. Г., Никитин И. С., Якушев В. Л. Применение наложенных сеток к расчету течений в областях переменной геометрии. *Сб. трудов XX юбилейной межд. конф. по выч. механике и совр. прикладным системам*. 2017:395–397. DOI:10.13140/RG.2.2.27386.39369.
10. Князев Д. В., Колпаков И. Ю. Точные решения задачи о течении вязкой жидкости в цилиндрической области с меняющимся радиусом. *Нелинейная динамика*. 2015;11(1):89–97.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред*. М.: Наука; 1982. 620 с.
12. Куликовский А. Г., Любимов Г. А. *Магнитная гидродинамика*. М.: Логос; 2005. 328 с.
13. Черняк В. Г., Суетин П. Е. *Механика сплошных сред: учебн. пособ. для вузов*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2006. 352 с.
14. Ландау Л. Л., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика*. М.: Наука; 1986. 736 с.
15. Седов Л. И. *Механика сплошных сред. Т. 2*. М.: Наука; 1970. 568 с.
16. Левитан Б. М., Саргсян И. С. *Операторы Штурма–Лиувилля и Дирака*. М.: Наука; 1988. 432 с.
17. Владимиров В. С. *Уравнения математической физики*. М.: Наука; 1981. 512 с.
18. Бардзокас Д. И., Фильштинский Л. А., Фильштинский М. Л. *Актуальные проблемы физических полей в деформируемых средах: В 5 т. Т. 1. Математический аппарат физических и инженерных наук*. М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; 2010. 864 с.
19. *The GNU Multiple Precision Arithmetic Library*. Режим доступа: <http://gmplib.org>.
20. Патанкар С. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат; 1984. 152 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-03

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ КОНЕЧНОСТИ ЧЕЛОВЕКА С
ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ****Д. В. Горбунов^{1,a}, Т. В. Гавриленко^{1,2}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
г. Сургут, Российская Федерация^a ✉ Gorbunov.dv@mail.ru

Аннотация: любое моделирование процессов, в том числе биологических, базируется на закономерностях, происходящих как внутри, так и снаружи объекта моделирования. Изучение динамики поведения сложных биосистем позволило установить некоторые закономерности, которые осложняют возможность эффективно моделировать динамику тех или иных параметров тем, что подобные системы обладают хаотической, самоорганизующейся структурой. В биосистемах нет возможности повторить начальное x_i , любое промежуточное x_n и конечное x_k состояния как системы в целом, так и любой отдельной подсистемы. В этой связи моделирование сложных биосистем должно базироваться на хаотических закономерностях. Созданная математическая модель позволяет максимально точно моделировать движение конечности человека в двумерной плоскости. В основу математической модели положены три принципа: во-первых, включение регуляторных механизмов модели осуществляется на основе теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью; во-вторых, траектория удержания конечности в пространстве (моделирование тремора человека) изменяет свое направление случайным образом в ограниченном диапазоне, что позволяет решить проблему моделирования системы с самоорганизующейся структурой; в-третьих, все изменения биосистемы происходят на основе случайных чисел. Созданная математическая модель является масштабируемой, что позволит в дальнейшем привести ее к трехмерному варианту с возможностью изменять количество мышечных пучков, задействованных в движении конечности человека.

Ключевые слова: математическое моделирование, движение конечности, хаотическая динамика.

Для цитирования: Горбунов Д. В., Гавриленко Т. В. Математическое моделирование движений конечности человека с хаотической динамикой. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):24–31. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-03.

SIMULATION OF HUMAN LIMB MOVEMENTS WITH CHAOTIC DYNAMICS**D. V. Gorbunov^{1,a}, T. V. Gavrilenko^{1,2}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation^a ✉ Gorbunov.dv@mail.ru

Abstract: any simulation of processes, including biological ones, follows the patterns occurring both inside and outside of the object. The study of complex biosystem dynamics identified some such patterns which complicate the simulation of system parameter dynamics since such systems have a chaotic, self-organizing structure. In biosystems, it is impossible to reproduce the initial x_i , any intermediate x_n and final x_k states of both the entire system and any subsystem. Simulation of complex biosystems should consider chaotic patterns. The proposed simulation model accurately represents the 2D movement of a human limb. The model implements three principles: the regulatory circuits of the model are represented by differential equations with discontinuous right-hand side; the limb trajectory (tremor simulation) direction is changed randomly in a limited range to simulate a self-organizing system; any changes to the biosystem are random. The model is scalable and can be applied to a 3D study with more muscle bundles controlling the movement of a human limb.

Keywords: simulation, limb movement, chaotic dynamics.

Cite this article: Gorbunov D. V., Gavrilenko T. V. Simulation of Human Limb Movements with Chaotic Dynamics. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):24–31. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-03.

Одним из вариантов проведения исследований в области изучения динамических объектов, в том числе биологических, является разработка модели, которая способна эффективно воспроизвести динамику поведения моделируемой системы. Для теоретической биофизики математическое моделирование позволяет более детально изучить, что происходит в биомеханической системе при осуществлении двигательных актов, а также детально исследовать процессы, проходящие не только в биомеханической системе, но и в нервно-мышечной, и в центральной нервной системе в целом. Создание математической модели открывает возможность изучать патологические процессы, что позволит разработать новые эффективные методы и способы диагностирования заболеваний при переходе к персонализированной медицине. Математическое моделирование биомеханической системы можно использовать при тестировании различных устройств (например, носимых устройств против тремора) или для подготовки спортсменов и т. д.

Функциональные системы организма человека работают в режиме самоорганизации с хаотической динамикой. На рис. 1 представлен пример хаотической динамики биомеханической системы. На этом рисунке виден некоторый уровень удержания позиции (длинный пунктир) и перемещение конечности в окрестности этого уровня (сплошная линия), а также траектория перемещения конечности (короткий пунктир).

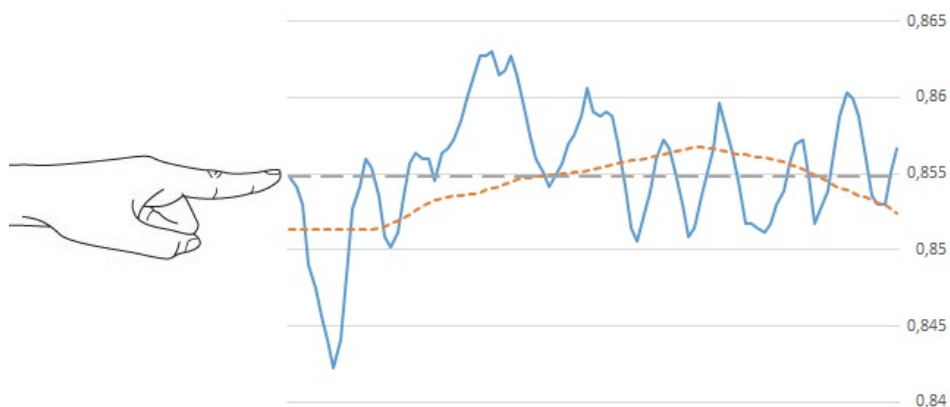


Рис. 1. Схематическое изображение симуляционной модели в интерпретации машинного алгоритма с уровнем удержания $x = \text{const}$

Биомеханические параметры системы непрерывно и хаотически изменяются (подтверждена гипотеза Н.А. Бернштейна «повторение без повторения» [1]). Установлено, что траектория движения конечности в пространстве $x \neq \text{const}$ (пример реального движения и траектории этого движения приведен на рис. 2, А и рис. 2, В соответственно). Соответственно, определение траектории удержания позиции можно осуществить с помощью дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, что облегчит построение математической модели биомеханической системы человека.

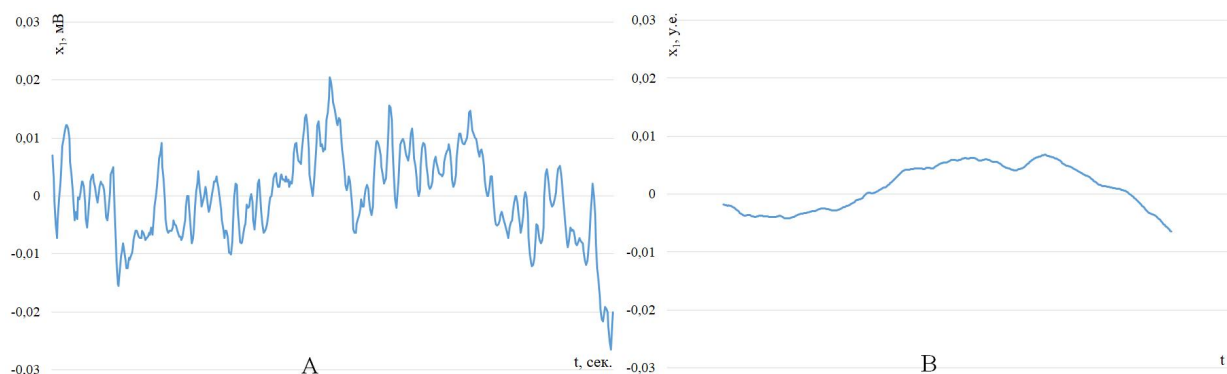


Рис. 2. Временная развертка треморограммы (А) и её траектория движения (В)

Как уже было отмечено ранее, движение биомеханической системы непрерывно изменяет вектор состояния системы (в двумерном случае в момент времени Δt_n система движется вверх, в другой Δt_{n+1} — вниз, движение вектора состояния системы осуществляется без возможности прогнозирования). На данный момент времени не было эффективных моделей, способных воспроизвести работу биомеханической системы с самоорганизующейся структурой, базирующихся на хаотической динамике движений биомеханической системы. Процесс создания эффективной модели, вероятнее всего, аналогичен поиску решения А. Ф. Филипповым [2]. Эффективность работы модели означает высокую степень приближения данных, полученных в ходе вычислительного эксперимента, к данным, полученным в ходе проведения натурных экспериментов в соответствии с установленными закономерностями динамики параметров биомеханической системы. В работе приведены два способа оценки эффективности: на основе математической статистики [3–5] и на основе теории хаоса-самоорганизации [6, 7].

Математическая модель биомеханической системы

При создании математической модели в основу был положен принцип случайного изменения параметров, т. е. все параметры генерируются из диапазонов на основе вихря Мерсенна [8]. Структура мышечных пучков в математической модели максимально приближена к структуре реальных мышечных пучков. На рис. 3 представлены некоторые мышечные пучки (рис. 3, А, рис. 3, С), между которыми проходит идеализированный уровень удержания конечности в пространстве (рис. 3, В). Сами же модельные мышечные пучки, как и реальные мышцы, обладают тремя типами мышечных волокон (на рис. 3, А и рис. 3, С обозначены разными размерами) [9]. В биосистемах отдельные мышечные волокна подчиняются закону «все или ничего», т. е. отдельное мышечное волокно либо сокращается (был преодолен барьерный уровень возбуждения мотонейрона), либо не сокращается. В работу могут быть включены только те мышечные волокна, которые готовы к работе, таким образом в математической модели реализован механизм утомления.

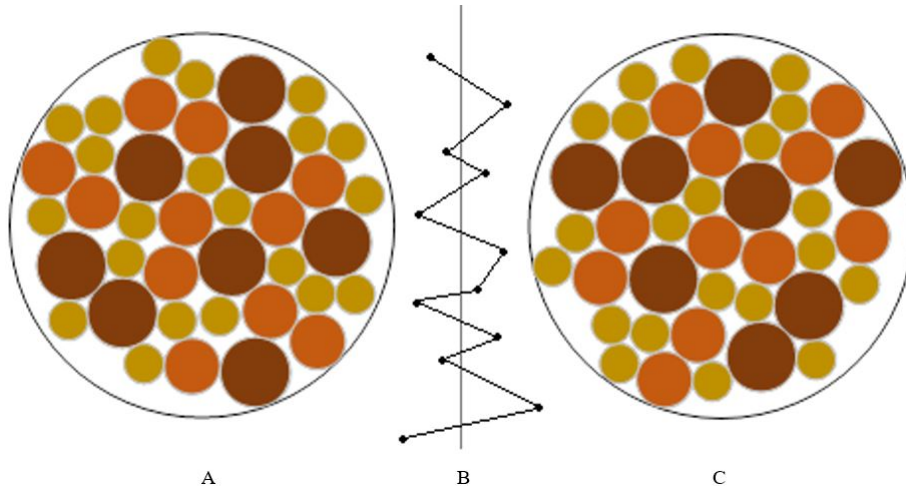


Рис. 3. Мышечная структура симуляционной модели

Разработанную симуляционную модель можно представить в математической форме:

$$S_i = \begin{cases} S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qp}} \sum_{k=1}^{a_{qp}} \sum_{j=1}^{l_{qp}} f_1(m_{pe}^+; t_{se}^+) f_2(m_{pk}^+; t_{ak}^+) f_3(m_{pj}^+; t_{lj}^+), \\ S_i \leq g_z(t), m_{pe}^+ - 1, m_{pk}^+ - 1, m_{pj}^+ - 1, z \in N, z < h, h \in N, \\ S_{i-1} + \sum_{e=1}^{s_{qn}} \sum_{k=1}^{a_{qn}} \sum_{j=1}^{l_{qn}} f_1(m_{ne}^+; t_{se}^+) f_2(m_{nk}^+; t_{ak}^+) f_3(m_{nj}^+; t_{lj}^+), \\ S_i \leq g_z(t), m_{ne}^+ - 1, m_{nk}^+ - 1, m_{nj}^+ - 1, z \in N, z < h, h \in N, \end{cases} \quad (1)$$

где S_i — моделируемый сигнал, s_{qp} , a_{qp} , l_{qp} , s_{qn} , a_{qn} , l_{qn} — количество мышечных волокон определенной группы мышц, которые могут быть включены в работу модели, f_i , $i=1 \dots 6$ — функция включения

определенной группы мышц и генерации потенциала усилия, m_{pe}^+ , m_{pk}^+ , m_{pj}^+ , m_{ne}^+ , m_{nk}^+ , m_{nj}^+ — значения счетчика, отслеживающего утомление определенного мышечного волокна из определенной группы мышц, $t_{se}^+ \in [x_{se}; y_{se}]$, $t_{ak}^+ \in [x_{ak}; y_{ak}]$, $t_{lj}^+ \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона, $t_{se}^- \in [x_{se}; y_{se}]$, $t_{ak}^- \in [x_{ak}; y_{ak}]$, $t_{lj}^- \in [x_{lj}; y_{lj}]$ — случайное «отрицательное» значение потенциала мышечного волокна из определенного диапазона, $g_z(t)$ — генерация уровня удержания определенной позиции на i -ой итерации, h — значения счетчика удержания позиции $g_z(t)$. Счет удержаний h жизненно необходим для адекватной работы модели, т. к. хаотический принцип организации функциональных систем не позволяет на длительном интервале времени Δt удерживать изолинию, т. е. уровень удержания позиции $g_z(t) \neq const$ на определенном Δt .

Включение мышечного волокна в работу осуществляется в том случае, если мышечные волокна не утомлены. Такой принцип работы мышечных волокон и групп мышц можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} f_1(m_{pe}^-, t_{se}^+) = f_1(m_{pe}^- * -1, t_{se}^+), P = 1 \\ f_2(m_{pk}^-, t_{ak}^+) = f_2(m_{pk}^- * -1, t_{ak}^+), P = 1 \\ f_3(m_{pj}^-, t_{lj}^+) = f_3(m_{pj}^- * -1, t_{lj}^+), P = 1 \\ f_4(m_{ne}^-, t_{se}^-) = f_4(m_{ne}^- * -1, t_{se}^-), P = 1 \\ f_5(m_{nk}^-, t_{ak}^-) = f_5(m_{nk}^- * -1, t_{ak}^-), P = 1 \\ f_6(m_{nj}^-, t_{lj}^-) = f_6(m_{nj}^- * -1, t_{lj}^-), P = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где P — функция вероятности включения $N = 0, 1$. Уровень удержания позиции $g_z(t)$ устанавливается по формуле:

$$g_z(t) = Q(t, c), \quad S < g_z(t), \quad z = 0, \quad h \in N, \quad z + 1, \quad z < h, \quad (3)$$

где $Q(t)$ — случайное значение из определенного диапазона. Функция $Q(t)$ производит генерацию нового уровня, если $z = h$, или когда наступает условие $g_z(t) < S_i$ при включенных в работу «отрицательных» мышцах, или $g_z(t) > S_i$ при работе «положительных» мышц.

Функция $Q(t)$ производит генерацию нового уровня, если $z = h$, или когда наступает условие $g_z(t) < S_i$ при включенных в работу «отрицательных» (Neg) мышцах, или $Q > S_i$ при работе «положительных» (Pos) мышц. В свою очередь диапазон генерации уровня удержания позиции варьируется на каждой итерации генерации $g_z(t)$. Смещение диапазона генерации уровня удержания записывается в следующей форме:

$$Q(c) = \begin{cases} A \in [-x + \Delta t; y + \Delta t], A(t) \geq \frac{g_{z-1}(t)}{2}, \Delta t = g_{z-1}(t), y < y_0 = const \\ A \in [-x - \Delta t; y - \Delta t], A(t) < \frac{g_{z-1}(t)}{2}, \Delta t = g_{z-1}(t), x > -x_0 = const \end{cases}, \quad (4)$$

где A — значение уровня удержания позиции, x , y — нижняя и верхняя границы генерации траектории, Δt — приращение к границам траектории.

Стоит отметить, что уравнения (3) и (4) способны описывать только произвольные движения человека, т. е. тремор. Для описания произвольных (теппинг) движений необходим другой механизм генерации уровня удержания позиции конечности в пространстве.

Визуализация результатов работы математической модели

Для визуализации данных, полученных на основе вычислительного эксперимента, представлен характерный пример, сопоставленный с данными, полученными на основе натурного эксперимента. На рис. 4, А временная развертка экспериментальной выборки, а на рис. 4, В — модельной выборки.

Из рис. 4, В видно, что модельная выборка имеет пилообразный вид и этим существенно отличается от выборки, полученной в ходе проведения натурного эксперимента (4, А). Такое существенное отличие связано с точностью проводимых экспериментов. Экспериментальная выборка получена на биоизмерительном комплексе (частотой квантования $\mu = 100$ Гц). Выборки, полученные в ходе проведения вычислительного эксперимента, получены на процессорном времени, что существенно превышает частоту дискретизации биоизмерительного комплекса, вследствие чего при построении АЧХ

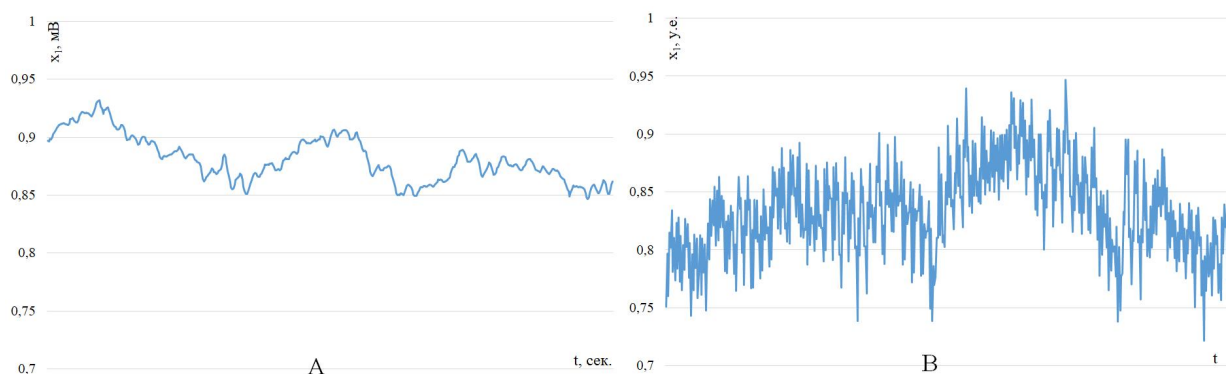


Рис. 4. Временная развертка: А — экспериментальной выборки; В — модельной выборки

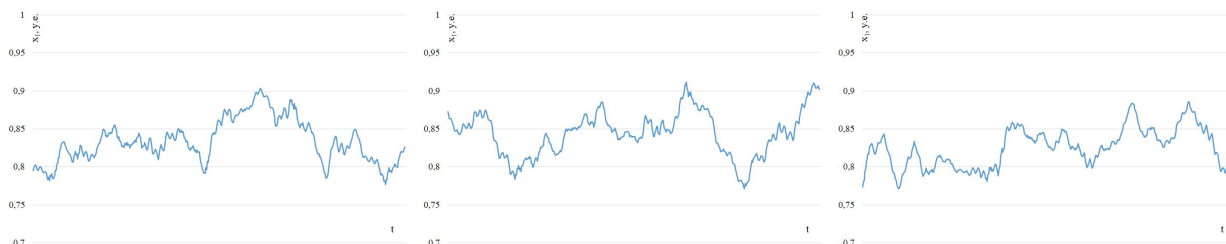


Рис. 5. Временные развертки сглаженных модельных выборок

видны всплески на частоте 50 Гц. Для устранения выбросов на АЧХ применялся простой фильтр высоких частот в виде скользящей средней. Результат применения фильтра представлен на серии выборок, полученных при проведении вычислительного эксперимента (рис. 5).

Сравнение экспериментальных и модельных данных методами математической статистики

Для проверки эффективности результатов вычислительных экспериментов строились матрицы парных сравнений (пары сравнения: экспериментальная выборка — экспериментальная выборка; модельная выборка — модельная выборка; экспериментальная выборка — модельная выборка). При построении подобных матриц для экспериментальных выборок установлена некоторая устойчивость числа пар совпадений (под словом «совпадения» понимается возможность отнесения сравниваемой пары к одной генеральной совокупности). Число совпадений для однородных треморограмм всегда в районе $k \approx 12\%$ (рис. 6, А) [6]. Для модельных выборок треморограмм установлено, что число таких совпадений находится на уровне $k \approx 12\%$ (рис. 6, В).

При сравнении экспериментальных и модельных выборок оказалось, что математическая статистика не может установить достоверные различия между сравниваемыми парами, т. к. число совпадений $k \approx 12\%$. Это демонстрирует высокую эффективность работы математической модели. Результат построения одной из многих таких матриц парных сравнений экспериментальных и модельных данных $k_{em} = 29$ (таблица 1).

Таким образом, продемонстрирована высокая эффективность разработанной математической модели. Представленная модель позволит осуществлять тестирование технически сложных устройств (например, носимых устройств против тремора), детально изучать патологические процессы и совершенствовать методы диагностирования этих процессов. С помощью данной модели открывается возможность разработки компенсационных механизмов для управления человеко-машинными системами.

Сравнительный анализ модельных и экспериментальных данных методами теории хаоса-самоорганизации

Определение понятия квазиаттрактора и способ расчета его параметров подробно представлены в журнале «Доклады Академии наук» [10]. С помощью расчетов параметров квазиаттракторов в рамках теории хаоса-самоорганизации можно проводить сравнительную оценку полученных выборок, а также осуществлять проверку полученных выборок на однородность [6]. Следует подчеркнуть, что выборки, полученные в рамках проведения натурных и вычислительных экспериментов, были однородны. На рис. 7, А представлен фазовый портрет для выборки, полученной в ходе натурального

Таблица 1

Матрица парных сравнений экспериментальных и модельных выборок треморограмм (число совпадений $k_{em} = 29$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.01	.00	.00	.00
2	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.34	.00	.00	.00
3	.00	.07	.00	.00	.00	.00	.91	.00	.00	.00	.00	.00	.94	.00	.00
4	.00	.00	.00	.00	.07	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.64	.00	.00	.00
5	.00	.99	.00	.00	.00	.00	.30	.00	.02	.00	.22	.00	.43	.00	.10
6	.00	.75	.00	.00	.00	.00	.23	.00	.07	.00	.50	.00	.27	.00	.01
7	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
8	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
9	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
10	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
11	.00	.00	.00	.00	.18	.00	.00	.01	.00	.00	.00	.60	.00	.00	.00
12	.00	.01	.00	.00	.00	.00	.69	.14	.28	.00	.00	.00	.51	.03	.14
13	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.09	.10	.63	.00	.00	.00	.10	.01	.65
14	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
15	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.23	.00	.00	.00

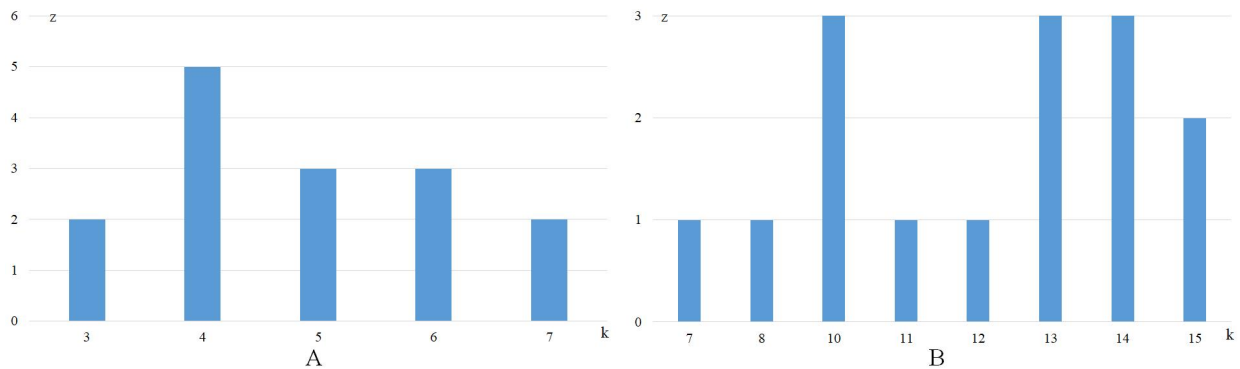


Рис. 6. Временные развертки сглаженных модельных выборок

эксперимента, здесь ось x_1 — значение треморограммы, а $x_2 = dx_1/dt$ — скорость изменения x_1 . На рис. 7, В представлен фазовый портрет для модельной выборки движения конечности.

С помощью рис. 7 можно сделать вывод, что траектории фазовых портретов имеют схожую динамику. Визуальное сравнение фазовых портретов (экспериментальная выборка (рис. 7, А) и модельная выборка (рис. 7, В)) позволяет сделать вывод, что разные выборки максимально приближены к динамике биомеханической системы организма человека. В таблице 2 приведены результаты расчетов площадей квазиаттракторов для двух серий экспериментов по 15 выборок — для экспериментальных выборок (S_1^1, S_2^1) и для модельных выборок (S_1^2, S_2^2). Математическая статистика не может установить значимые различия для выборок S квазиаттракторов.

Заключение

При проведении исследования были выявлены проблемы, с целью решения которых потребовалось разработать математическую модель на основе теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью для биомеханической системы человека. В результате установлено, что разработанная математическая модель может с высокой эффективностью воспроизводить динамику поведения биомеханической системы. При сравнительном анализе данных, полученных в ходе проведения вычислительных и натурных экспериментов, на основе математической статистики и методов теории хаоса-самоорганизации установлена высокая эффективность математической модели. Также следует подчеркнуть, что математическая модель способна воспроизводить хаотическую динамику движений в рамках

Таблица 2

Значение площадей квазиаттракторов для выборок треморограмм: экспериментальных (S^1) и модельных (S^2) данных

	S^1 , у.е.	S^2 , у.е.	S^1 , у.е.	S^2 , у.е.
1	9.82	11.76	18.78	10.97
2	18.77	13.82	8.37	14.29
3	8.37	8.70	10.09	10.03
4	7.32	12.29	7.41	11.04
5	5.45	10.60	8.38	13.77
6	18.29	14.99	6.45	13.07
7	8.38	12.00	11.64	12.84
8	9.38	8.98	13.78	10.15
9	4.99	13.48	10.88	13.98
10	11.64	9.89	10.33	15.10
11	6.11	12.67	17.20	9.86
12	20.70	12.92	8.90	12.48
13	17.20	12.27	5.84	12.18
14	10.88	10.00	8.06	15.54
15	10.33	13.93	12.96	13.01
< S >	11.18	11.89	10.60	12.47
	уровень значимости $p_1 = 0.49$		уровень значимости $p_2 = 0.19$	

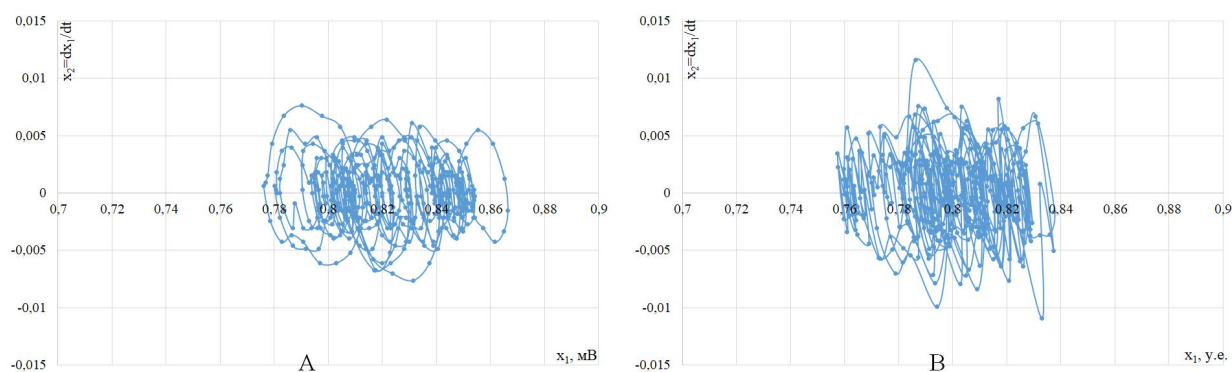


Рис. 7. Фазовые плоскости для треморограмм: А — реальная выборка; В — модельная выборка

гипотезы Н.А. Бернштейна «повторение без повторения». Для теоретической биофизики математическая модель может использоваться в целях раскрытия механизмов работы не только биомеханической системы, но и нервно-мышечной системы, а также, при усложнении модели, — и центральной нервной системы. С помощью предложенной модели открываются новые возможности тестирования различных технических систем (например, человеко-машинных систем, манипуляторов, носимых устройств против тремора и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Н. А. *О построении движений*. М. : Медгиз; 1947.
2. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. *Матем. сб.* 1960;51(1):99–128.
3. Еськов В. В., Гавриленко Т. В., Еськов В. М. и др. Феномен статистической неустойчивости систем третьего типа — complexity. *Журнал технической физики*. 2017;87(11):1609–1614. DOI: 10.21883/JTF.2017.11.45117.2158.
4. Еськов В. М., Еськов В. В., Гавриленко Т. В. и др. Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна. *Биофизика*. 2017;62(1):168–176.
5. Еськов В. В., Еськов В. М., Вохмина Ю. В. Гипотеза Н. А. Бернштейна и статистическая неустойчивость выборок параметров треморограмм. *Вестник кибернетики*. 2018;29(1):33–38.

6. Горбунов Д. В. Однородность и неоднородность параметров движений человека. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:68–75. DOI: 10.12737/article_5c2201c82feb71.88457170.
7. Иляшенко Л. К., Баженова А. Е., Берестин Д. К. и др. Хаотическая динамика параметров треморограмм в условиях стресс-воздействий. *Российский журнал биомеханики*. 2018;22(1):74–84. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.1.06.
8. Nishimura T. Tables of 64-bit Mersenne twisters. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2000;10(4):234–357.
9. Капилевич Л. В. *Физиологические методы контроля в спорте*. Томск : Изд-во Томского политехнического университета; 2009.
10. Бетелин В. Б., Еськов В. М., Галкин В. А. и др. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем. *Доклады Академии наук*. 2017;472(6):642–644. DOI: 10.7868/S0869565217060044.
11. Горбунов Д. В. Симуляционное моделирование движения конечности человека. *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2020;23(1):32–43.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-04

МНОЖЕСТВЕННОЕ L_v -ОЦЕНИВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**С. И. Носков^a, М. П. Базилевский^b***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4097-2720>, sergey.noskov.57@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, mik2178@yandex.ru

Аннотация: для оценки моделей множественной линейной регрессии существует много различных математических методов: наименьших квадратов, модулей, антиробастного оценивания, L_v -оценивания, множественного оценивания. Целью данной работы является обобщение указанных методов оценивания единой функцией потерь. Сначала была сформулирована задача оценивания, в которой в качестве критериев минимизации выступают критерии для антиробастного и L_v -оценивания. Недостатком сформулированной задачи является то, что для ее численного решения затруднительно определять начальные значения параметров, поскольку переменные могут иметь разные масштабы. Кроме того, функция потерь для этой задачи является неоднородной, что также затрудняет процесс оценивания. Для решения этих проблем введен новый критерий, равный критерию антиробастного оценивания, возведенному в степень v . С помощью него и функции потерь для L_v -оценивания сформулирована задача множественного L_v -оценивания. Функционал этой задачи является однородным, поэтому для проведения множественного L_v -оценивания целесообразно нормировать исходные переменные и переходить к оценкам стандартизованной линейной регрессии. Предложен алгоритм, по которому рекомендуется проводить множественное L_v -оценивание. В результате проведения множественного L_v -оценивания формируется множество, содержащее оценки линейной регрессии, полученные как известными методами, так и новыми. Правильный выбор наилучших из полученного множества оценок пока остается открытой научной задачей. С помощью предложенного множественного L_v -оценивания успешно решена задача моделирования железнодорожных пассажирских перевозок Иркутской области.

Ключевые слова: регрессионная модель, метод наименьших модулей, метод наименьших квадратов, метод антиробастного оценивания, метод L_v -оценивания, метод множественного оценивания, метод множественного L_v -оценивания.

Для цитирования: Носков С. И., Базилевский М. П. Множественное L_v -оценивание линейных регрессионных моделей. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):32–40. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-04.

MULTIPLE L_v -ESTIMATION OF LINEAR REGRESSION MODELS**S. I. Noskov^a, M. P. Bazilevskiy^b***Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4097-2720>, sergey.noskov.57@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, mik2178@yandex.ru

Abstract: there are many methods for estimating multiple linear regression models: ordinary least squares, least absolute deviations, anti-robust estimation, L_v -estimation, and multiple estimations. The purpose of this work is to generalize these methods by a loss function. First, an estimation problem was formulated where the minimization criteria are the anti-robust and L_v -estimations. The disadvantage of this problem statement is that it is difficult to determine the initial values of the parameters for a numerical solution, since the variables may have different scales. Besides, the loss function is non-uniform, which also complicates the estimation. To solve these problems, we introduced a new criterion, equal to the anti-robust estimation criterion raised to the power v . We stated the problem of multiple L_v -estimation using the new criterion and the loss function. The functional of this problem is homogeneous, therefore, for multiple L_v -estimations, it is advisable to normalize the initial variables and then apply the standardized linear regression estimates. We also developed an algorithm for multiple L_v -estimations. A result of such estimations is a set containing linear regression estimates obtained both by the existing and new methods. The optimal choice of the best estimates from the set of estimates remains an open problem. We successfully simulated the passenger railway traffic in the Irkutsk region with the proposed multiple L_v -estimations.

Keywords: regression model, least absolute deviations, ordinary least squares, anti-robust estimation, L_v -estimation, multiple estimations, multiple L_v -estimation method.

Cite this article: Noskov S. I., Bazilevskiy M. P. Multiple L_v -estimation of Linear Regression Models. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):32–40. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-04.

Введение

В настоящее время одним из эффективных инструментов математического моделирования является регрессионный анализ [1, 2]. Простейшей регрессионной моделью считается линейная регрессия вида:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n — объем выборки; m — число объясняющих переменных; y_i — i -е значение объясняемой переменной; x_{ij} — i -е значение j -й объясняющей переменной; $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ — неизвестные параметры; ε_i — i -я ошибка аппроксимации.

Существуют различные методы нахождения неизвестных параметров линейной регрессии (1): метод максимального правдоподобия, моментов, наименьших квадратов и модулей, антиробастного и множественного оценивания и т. д. При этом вопрос о том, какой из существующего арсенала метод лучше подходит для оценки модели (1), остается нерешенным. Большинство исследователей в своих научных работах отдает предпочтение методу наименьших квадратов (МНК) [3, 4], состоящему в решении задачи:

$$J_2(\alpha) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Распространенность МНК объясняется простотой решения задачи (2), сводящейся к решению системы линейных алгебраических уравнений.

Однако эффективность МНК резко снижается тогда, когда обрабатываемая выборка содержит выбросы — наблюдения, плохо согласующиеся с остальными. В этих случаях пользуются робастными [5, 6], т. е. менее чувствительными к выбросам, чем МНК, методами оценивания. К их числу относится метод наименьших модулей (МНМ) [7], суть которого состоит в решении задачи:

$$J_1(\alpha) = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i| \rightarrow \min. \quad (3)$$

В монографии [8] показано, что задача (3) может быть сведена к задаче линейного программирования (ЛП):

$$\sum_{i=1}^n (u_i + v_i) \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$\alpha_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j x_{ij} + u_i - v_i = y_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$u_i \geq 0, \quad v_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Противоположным по отношению к МНМ является метод антиробастного оценивания (МАО) [8], применяемый тогда, когда исследователь убежден в уникальности каждого наблюдения выборки и когда длина ее сильно ограничена, поэтому игнорировать какие-то наблюдения, используя робастные или близкие к ним методы, может оказаться нерациональным. Антиробастная оценка является решением задачи:

$$J_\infty(\alpha) = \max_k |\varepsilon_k| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Такая оценка [8] определяется с помощью решения задачи ЛП, состоящей из ограничений (5), (6),

$$u_i + v_i \leq g, \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

и целевой функции

$$g \rightarrow \min. \quad (9)$$

Обобщением МНК, МНМ и МАО является так называемое L_ν -оценивание [9], состоящее в решении задачи:

$$J_\nu(\alpha) = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^\nu \rightarrow \min. \quad (10)$$

В [9] отмечено, что функция (10) при $\nu \geq 1$ выпукла вниз, а это означает, что при $\nu \geq 1$ существует единственный локальный минимум, который совпадает с глобальным. Как видно, при $\nu = 1$ L_ν -оценки совпадают с МНМ-оценками, при $\nu = 2$ — с МНК-оценками, а при $\nu \rightarrow \infty$ с МАО-оценками.

Для решения задачи (10) при $\nu \geq 1$ разработан метод, названный в [10] итеративным МНК, а в [11] — методом вариационно-взвешенных квадратичных приближений (МВВКП).

В работах [8, 12, 13] рассмотрен метод множественного оценивания (ММО) параметров линейной регрессии (1), в котором в качестве критериев минимизации используются два: J_1 и J_∞ , являющиеся полярными по отношению к выбросам. ММО предполагает решение двухкритериальной задачи ЛП с ограничениями (5), (6), (8) и с векторным критерием $J = (J_1, J_\infty)$. Ее решение можно получить, предварительно сформировав линейную свертку критериев J_1 и J_∞ с изменяющимися положительными коэффициентами λ :

$$J_\lambda = \lambda \cdot J_1 + (1 - \lambda) \cdot J_\infty, \quad \lambda \in [0, 1].$$

Тогда, равномерно разбивая отрезок $\lambda \in [0, 1]$ как можно большим количеством точек и решая для каждой из них задачу $\lambda \cdot \sum_{i=1}^n (u_i + v_i) + (1 - \lambda) \cdot g \rightarrow \min$ с ограничениями (5), (6) и (8), можно получить множество оценок ММО, представляющее собой множество Парето в критериальном пространстве (J_1, J_∞) . Для этого можно воспользоваться программным комплексом МОМ [14].

Данная работа посвящена исследованию возможного симбиоза ММО с L_ν -оцениванием.

Множественное L_ν -оценивание

Для линейной регрессии (1) сформулируем задачу оценивания, в которой в качестве критериев минимизации выступают J_ν и J_∞ , $\nu \geq 1$. По смыслу такая задача ничем не отличается от формулировки ММО, а при $\nu = 1$ и вовсе эквивалентна ей. Однако можно заметить, что при $\nu \rightarrow \infty$ критерий $J_\nu \rightarrow J_\infty$, поэтому двухкритериальная задача с векторным критерием (J_ν, J_∞) при больших ν трансформируется в однокритериальную для МАО. Поэтому интерес вызывают только оценки, полученные предлагаемым методом при небольших значениях ν , которые могут быть лучше в некотором смысле, чем оценки, полученные известными на сегодняшний день методами.

Считая, что число ν задано, составим линейную свертку критериев J_ν и J_∞ :

$$J_{\lambda, \nu} = \lambda \cdot J_\nu + (1 - \lambda) \cdot J_\infty, \quad \lambda \in [0, 1].$$

Тогда, разбивая отрезок $\lambda \in [0, 1]$ некоторым количеством точек и решая для каждой из них оптимизационную задачу с целевой функцией

$$J_{\lambda, \nu}(\alpha) = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^\nu + (1 - \lambda) \cdot \max_k |\varepsilon_k| = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n (u_i + v_i)^\nu + (1 - \lambda) \cdot g \rightarrow \min \quad (11)$$

и с ограничениями (5), (6) и (8), можно получить множество оценок линейной регрессии.

Решение задачи (11) с линейными ограничениями (5), (6) и (8) нетрудно получить при $\nu = 1$, когда она является задачей ЛП для любого λ , при $\lambda = 0$, когда она является линейной для любого ν , и при $\lambda = 1$, когда можно воспользоваться МВВКП. В остальных случаях она является задачей нелинейного программирования и может быть решена численно с использованием специализированных программ. Применение численных методов для решения задачи (11) с ограничениями (5), (6) и (8) сопряжено с двумя проблемами.

1. Неясно, как задавать начальные значения переменных, чтобы численный метод сходил к глобальному минимуму.

2. Функция (11) является неоднородной. Действительно, величина первого критерия $J_\nu = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^\nu$ зачастую может быть в значительной степени больше, чем величина второго $J_\infty = \max_k |\varepsilon_k|$. Поэтому равномерное разбиение отрезка $\lambda \in [0,1]$ из-за доминирования первого критерия при минимизации может приводить к получению во всех точках, кроме $\lambda = 0$, одинаковых оценок.

Для решения этих проблем возведем критерий J_∞ в степень ν и рассмотрим задачу оценивания линейной регрессии по критериям J_ν и J_∞^ν , $\nu \geq 1$, которую будем называть множественным L_ν -оцениванием. Очевидно, что такая задача по смыслу эквивалентна задаче оценивания модели (1) по критериям J_ν и J_∞ . Для заданного ν линейная свертка критериев J_ν и J_∞^ν имеет вид:

$$J_{\lambda,\nu}^* = \lambda \cdot J_\nu + (1 - \lambda) \cdot J_\infty^\nu, \quad \lambda \in [0,1].$$

Поскольку $J_\infty^\nu = \left(\max_k |\varepsilon_k| \right)^\nu = \max_k |\varepsilon_k|^\nu$, то после разбиения отрезка $\lambda \in [0,1]$ точками для каждой из них нужно решить либо оптимизационную задачу с целевой функцией

$$J_{\lambda,\nu}^*(\alpha) = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n (u_i + v_i)^\nu + (1 - \lambda) \cdot g^\nu \rightarrow \min \quad (12)$$

и с линейными ограничениями (5), (6), (8), либо с целевой функцией

$$J_{\lambda,\nu}^*(\alpha) = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n (u_i + v_i)^\nu + (1 - \lambda) \cdot g^* \rightarrow \min, \quad (13)$$

с линейными ограничениями (5), (6) и нелинейными ограничениями

$$(u_i + v_i)^\nu \leq g^*, \quad i = \overline{1,n}. \quad (14)$$

Задача (12) с ограничениями (5), (6), (8) и задача (13) с ограничениями (5), (6), (14) являются эквивалентными. Вопрос о том, с какой из этих двух задач численные методы справляются эффективнее, пока остается открытым. Предпочтительнее, на наш взгляд, выглядит задача с целевой функцией (12), (5), (6), (8), поскольку область ее допустимых решений для любого ν представляет собой выпуклый многоугольник.

Очевидно, что функция (12) является однородной степени ν . Заметим, что все известные функции потерь — для МНМ, МНК, МАО, ММО и L_ν -оценивания — обладают свойством однородности. Функция (11) при $\nu > 1$ этим свойством не обладает.

Из-за однородности функции (12), во-первых, корректно разбивать отрезок $\lambda \in [0,1]$ точками равномерно, во-вторых, для удобства множественного L_ν -оценивания позволительно нормировать исходные переменные $\bar{y}, x_1, x_2, \dots, x_m$ и переходить к оценкам стандартизованной линейной регрессии.

Проведем нормирование исходных переменных по правилам:

$$y_i^* = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}, \quad x_{i1}^* = \frac{x_{i1} - \bar{x}_1}{\sigma_{x_1}}, \quad \dots, \quad x_{im}^* = \frac{x_{im} - \bar{x}_m}{\sigma_{x_m}}, \quad i = \overline{1,n},$$

где $\bar{y}, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ — средние значения переменных, а $\sigma_y, \sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_m}$ — их среднеквадратические отклонения.

Тогда модель стандартизованной линейной регрессии имеет вид:

$$y_i^* = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij}^* + \xi_i, \quad i = \overline{1,n}, \quad (15)$$

где $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ — неизвестные стандартизованные параметры; ξ_i — новая i -я ошибка аппроксимации.

Множественное L_ν -оценивание параметров стандартизованной регрессии (15) предполагает решение задачи:

$$J_{\lambda,\nu}^*(\beta) = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n |\xi_i|^\nu + (1 - \lambda) \cdot \max_k |\xi_k|^\nu \rightarrow \min. \quad (16)$$

Нетрудно доказать, что оптимальное решение задачи (16) для заданного $\lambda \in [0,1]$ и $\nu \geq 1$ совпадает с оптимальным решением задачи $J_{\lambda,\nu}^*(\alpha) \rightarrow \min$. Для этого подставим в функцию (16) выраженные из (15) ошибки аппроксимации:

$$J_{\lambda,\nu}^*(\beta) = \lambda \cdot \sum_{i=1}^n \left| y_i^* - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij}^* \right|^\nu + (1 - \lambda) \cdot \max_k \left| y_i^* - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij}^* \right|^\nu.$$

С учетом правил нормирования переменных перепишем это выражение в виде:

$$\begin{aligned} J_{\lambda,\nu}^*(\beta) &= \lambda \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_{x_j}} \right|^\nu + \\ &+ (1 - \lambda) \cdot \max_k \left| \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_{x_j}} \right|^\nu = \\ &= \frac{1}{\sigma_y^\nu} \lambda \cdot \sum_{i=1}^n \left| y_i - \bar{y} - \beta_0 \sigma_y - \sum_{j=1}^m \beta_j \sigma_y \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_{x_j}} \right|^\nu + \\ &+ \frac{1}{\sigma_y^\nu} (1 - \lambda) \cdot \max_k \left| y_i - \bar{y} - \beta_0 \sigma_y - \sum_{j=1}^m \beta_j \sigma_y \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_{x_j}} \right|^\nu. \end{aligned}$$

Сделаем в этом выражении замену переменных

$$\alpha_j = \beta_j \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_j}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad \alpha_0 = \bar{y} + \beta_0 \sigma_y - \sum_{j=1}^m \alpha_j \bar{x}_j, \quad (17)$$

получим $J_{\lambda,\nu}^*(\beta) = \frac{1}{\sigma_y^\nu} \left(\lambda \cdot \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^\nu + (1 - \lambda) \cdot \max_k |\varepsilon_k|^\nu \right) = \frac{1}{\sigma_y^\nu} \cdot J_{\lambda,\nu}^*(\alpha)$. Отсюда следует, что минимизация функции $J_{\lambda,\nu}^*(\beta)$ равносильна минимизации функции $J_{\lambda,\nu}^*(\alpha)$. Формулы (17) устанавливают связь между параметрами стандартизованной (15) и исходной линейной регрессии (1).

Проводить множественное L_ν -оценивание можно, например, по следующему алгоритму.

1. Назначить область изменения параметра $\nu \in [1, \nu_{\text{наиб}}]$, где $\nu_{\text{наиб}}$ — его наибольшее значение. Выбрать $\nu_{\text{наиб}}$ можно следующим образом. Сначала оценить линейную регрессию по МАО и найти значение критерия $J_\infty(\bar{\alpha})$. Затем последовательно находить L_ν -оценки модели по МВВКП, последовательно увеличивая параметр ν от единицы до тех пор, пока критерий антиробастности регрессии $\max_k |\varepsilon_k|$ будет достаточно отличен от $J_\infty(\bar{\alpha})$. Как отмечено выше, проводить множественное L_ν -оценивание при больших ν вряд ли имеет смысл.

2. Провести нормирование переменных.

3. Равномерно разбить отрезки $\nu \in [1, \nu_{\text{наиб}}]$ и $\lambda \in [0,1]$ точками и в каждой такой точке для нормированных данных решить либо задачу (12) с ограничениями (5), (6), (8), либо задачу (13) с ограничениями (5), (6), (14). Поскольку переменные нормированы, то в качестве их начальных приближений при реализации численных методов можно указать нули. Для большей надежности при решении задачи нелинейного программирования для некоторого узла сети (ν, λ) желательно использовать в качестве начальных приближений оценки соседних узлов.

4. По формулам (17) для каждого узла сети (ν, λ) от оценок стандартизованной регрессии перейти к оценкам исходной регрессии (1).

Выбор из полученного множества оценок с наилучшими свойствами пока остается открытой научной задачей.

Моделирование

Для демонстрации метода множественного L_ν -оценивания решалась задача моделирования пассажирских железнодорожных перевозок в Иркутской области. Для этого были использованы статистические данные (табл. 1) за 2000–2020 гг. по следующим переменным:

y — отправление пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования (тыс. человек);

x_1 — число собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения (штук);

x_2 — средние потребительские цены на полет в салоне экономического класса самолета (в расчете на 1000 км пути) за декабрь (рублей).

Таблица 1

Статистические данные

Год	y	x_1	x_2	Год	y	x_1	x_2
2000	22133	138,8	1000,63	2011	18059	224,3	5863,89
2001	23216	140	1058,38	2012	17266	251,5	5888,33
2002	23363	147,2	1272,93	2013	14930	271,8	3554,45
2003	25122	151,6	1804,49	2014	14161	270,5	3641,52
2004	26435	156,5	1962,69	2015	12967	271,3	5095,42
2005	26247	143,3	2819,53	2016	12998	242,7	5297,99
2006	27817	154,8	3529,62	2017	12003	246,2	5129,7
2007	28501	169,2	4811,21	2018	11796	245,6	4669,4
2008	28757	188,2	6590,97	2019	11907	254,9	4416,62
2009	22427	189,8	6202,74	2020	9294	261,6	4653,39
2010	19774	202,6	5633,74				

Значения параметра ν задавались равными 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 10 и 20. Отрезок $\lambda \in [0,1]$ был разбит равномерно девятью точками. Сначала данные были нормированы, а затем для каждого узла из сети (ν, λ) с помощью онлайн-решателя APMonitor решалась задача (12) с ограничениями (5), (6), (8). В качестве начальных приближений переменных были указаны нули. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

В каждой ячейке табл. 2 приведен вектор $A = (\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, J_\nu(\bar{\alpha}), J_\infty^\nu(\bar{\alpha}), J_1(\bar{\alpha}), J_\infty(\bar{\alpha}))$, где $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$ — оценки линейной регрессии, пересчитанные по формулам (17), $J_\nu(\bar{\alpha}), J_\infty^\nu(\bar{\alpha}), J_1(\bar{\alpha}), J_\infty(\bar{\alpha})$ — значения функций потерь для оценок $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$.

По табл. 2 видно, что в критериальном пространстве (J_ν, J_∞^ν) при $\nu = 1$ получено 4 паретовских вершины, а начиная с $\nu = 1.5$ паретовская вершина получается для каждого значения λ , т. е. на отрезке $\lambda \in [0,1]$ образуется выпуклая вниз фигура. Более того, в критериальном пространстве (J_1, J_∞) можно наблюдать точно такую же картину (рис.).

По рис. можно проследить, как быстро с увеличением ν двухкритериальная задача с векторным критерием (J_ν, J_∞^ν) трансформируется в однокритериальную задачу антиробастного оценивания.

Затем методом «идеальной» точки из табл. 1 были выбраны оптимальные оценки с точки зрения критериев J_1 и J_∞ . Сначала эти критерии были нормированы по правилам

$$\bar{J}_1(\lambda, \nu) = \frac{J_1(\lambda, \nu) - \min J_1}{\max J_1 - \min J_1}, \quad \bar{J}_\infty(\lambda, \nu) = \frac{J_\infty(\lambda, \nu) - \min J_\infty}{\max J_\infty - \min J_\infty}.$$

После чего была назначена «идеальная» точка (0,0) и выбрана альтернатива, наиболее близкая к этой точке с точки зрения евклидова расстояния

$$r = \min_{\lambda, \nu} \sqrt{(\bar{J}_1(\lambda, \nu))^2 + (\bar{J}_\infty(\lambda, \nu))^2}.$$

Ею оказалась альтернатива, для которой $\nu = 1,5, \lambda = 0,7$. Уравнение линейной регрессии для этих параметров имеет вид:

$$\bar{y} = 41847 - 128,95x_1 + 1,015x_2. \quad (18)$$

Критерии адекватности модели (18) $J_1 = 48490, J_\infty = 4525$.

Уравнение (18) удовлетворяет содержательному смыслу решаемой задачи. Переменная x_1 оказывает обратное влияние на y , поскольку рост благосостояния населения, а значит, и числа легковых

Таблица 2

Результаты моделирования

λ v	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	10	20
0	(43522; -131,95; 0,921; 50903; 3997; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 2,75E+06; 2,53E+05; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 1,54E+08; 1,60E+07; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 8,80E+09; 1,01E+09; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 5,14E+11; 6,39E+10; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 3,04E+13; 4,04E+12; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 1,82E+15; 2,55E+14; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 1,10E+17; 1,61E+16; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 6,66E+18; 1,02E+18; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 5,44E+36; 1,04E+36; 50903; 3997)	(43522; -131,95; 0,921; 4,84E+72; 1,08E+72; 50903; 3997)
0,1	(41216; -125,87; 1,088; 49079; 4058; 49079; 4058)	(41716; -127,19; 1,052; 2,65E+06; 2,57E+05; 49449; 4045)	(42139; -128,3; 1,021; 1,48E+08; 1,63E+07; 49762; 4034)	(42350; -128,86; 1,006; 8,45E+09; 1,03E+09; 49918; 4028)	(42490; -129,23; 0,996; 4,91E+11; 6,52E+10; 50021; 4024)	(42595; -129,50; 0,988; 2,90E+13; 4,13E+12; 50098; 4022)	(42676; -129,72; 0,982; 1,73E+15; 2,61E+14; 50158; 4020)	(42744; -129,90; 0,977; 1,04E+17; 1,65E+16; 50208; 4018)	(42802; -130,05; 0,973; 6,31E+18; 1,04E+18; 50252; 4016)	(43135; -130,92; 0,949; 5,08E+36; 1,07E+36; 50498; 4007)	(43337; -131,45; 0,934; 4,48E+72; 1,11E+72; 50647; 4002)
0,2	(41216; -125,87; 1,088; 49079; 4058; 49079; 4058)	(41399; -126,35; 1,075; 2,65E+06; 2,58E+05; 49214; 4053)	(41821; -127,47; 1,044; 1,47E+08; 1,63E+07; 49526; 4042)	(42019; -127,99; 1,030; 8,41E+09; 1,04E+09; 49673; 4037)	(42144; -128,31; 1,021; 4,89E+11; 6,56E+10; 49766; 4033)	(42235; -128,56; 1,014; 2,88E+13; 4,16E+12; 49832; 4031)	(42304; -128,73; 1,009; 1,71E+15; 2,64E+14; 49884; 4029)	(42364; -128,90; 1,005; 1,03E+17; 1,67E+16; 49928; 4028)	(42417; -129,04; 1,007; 6,22E+18; 1,06E+18; 49967; 4026)	(42812; -130,07; 0,972; 4,93E+36; 1,09E+36; 50259; 4016)	(43145; -130,95; 0,948; 4,30E+72; 1,14E+72; 50506; 4007)
0,3	(41216; -125,87; 1,088; 49079; 4058; 49079; 4058)	(41308; -126,11; 1,081; 2,65E+06; 2,58E+05; 49147; 4055)	(41715; -127,19; 1,052; 1,47E+08; 1,64E+07; 49448; 4045)	(41908; -127,69; 1,038; 8,40E+09; 1,04E+09; 49591; 4040)	(42028; -128,01; 1,029; 4,88E+11; 6,58E+10; 49679; 4037)	(42110; -128,23; 1,023; 2,87E+13; 4,17E+12; 49740; 4034)	(42173; -128,39; 1,019; 1,71E+15; 2,64E+14; 49787; 4033)	(42226; -128,53; 1,015; 1,03E+17; 1,68E+16; 49826; 4031)	(42273; -128,66; 1,012; 6,20E+18; 1,06E+18; 49861; 4030)	(42666; -129,69; 0,983; 4,90E+36; 1,10E+36; 50152; 4020)	(43075; -130,91; 0,963; 4,17E+72; 1,18E+72; 50478; 4015)
0,4	(41216; -125,87; 1,088; 49079; 4058; 49079; 4058)	(41354; -126,43; 1,073; 2,63E+06; 2,65E+05; 49015; 4126)	(41672; -127,10; 1,054; 1,47E+08; 1,64E+07; 49394; 4056)	(41851; -127,54; 1,042; 8,40E+09; 1,04E+09; 49549; 4041)	(41966; -127,85; 1,034; 4,88E+11; 6,58E+10; 49634; 4038)	(42047; -128,06; 1,028; 2,87E+13; 4,18E+12; 49693; 4036)	(42105; -128,21; 1,024; 1,71E+15; 2,65E+14; 49737; 4034)	(42154; -128,34; 1,020; 1,03E+17; 1,68E+16; 49773; 4033)	(42197; -128,45; 1,017; 6,20E+18; 1,07E+18; 49805; 4032)	(42597; -129,71; 1,001; 4,85E+36; 1,13E+36; 50134; 4030)	(43034; -130,92; 0,948; 4,10E+72; 1,22E+72; 50468; 4021)
0,5	(42966; -133,79; 0,87; 47531; 5236; 47531; 5236)	(41574; -127,49; 1,044; 2,61E+06; 2,82E+05; 48763; 4299)	(41782; -127,73; 1,037; 1,46E+08; 1,75E+07; 49181; 4180)	(41963; -127,86; 1,032; 8,35E+09; 1,08E+09; 49423; 4109)	(42088; -129,05; 1,049; 4,81E+11; 7,36E+10; 49327; 4190)	(42126; -129,10; 1,051; 2,84E+13; 4,63E+12; 49616; 4157)	(42151; -129,10; 1,052; 1,69E+15; 2,91E+14; 49694; 4131)	(42173; -129,10; 1,051; 1,01E+17; 1,83E+16; 49752; 4112)	(42195; -129,10; 1,049; 6,13E+18; 1,15E+18; 49798; 4096)	(42515; -129,71; 1,021; 4,81E+36; 1,16E+36; 50111; 4041)	(42980; -130,92; 0,987; 4,05E+72; 1,26E+72; 50453; 4028)
0,6	(43755; -145,35; 1,178; 46949; 6495; 46949; 6495)	(41847; -128,95; 1,015; 2,60E+06; 3,29E+05; 48364; 4770)	(42061; -130,15; 1,064; 1,44E+08; 1,99E+07; 48989; 4460)	(42186; -130,48; 1,075; 8,23E+09; 1,28E+09; 49295; 4389)	(42227; -130,40; 1,076; 4,77E+11; 8,08E+10; 49473; 4323)	(42242; -130,25; 1,074; 2,81E+13; 5,09E+12; 49566; 4271)	(42251; -130,11; 1,072; 1,67E+15; 3,21E+14; 49669; 4232)	(42260; -130,00; 1,070; 1,00E+17; 2,02E+16; 49728; 4202)	(42269; -129,90; 1,066; 6,06E+18; 1,27E+18; 49774; 4177)	(42514; -129,90; 1,029; 4,78E+36; 1,23E+36; 50098; 4063)	(42962; -130,92; 0,991; 4,04E+72; 1,28E+72; 50448; 4030)
0,7	(43755; -145,35; 1,178; 46949; 6495; 46949; 6495)	(42051; -131,29; 1,067; 2,59E+06; 3,29E+05; 48364; 4770)	(42235; -131,85; 1,099; 1,44E+08; 2,14E+07; 48959; 4625)	(42322; -131,81; 1,101; 8,19E+09; 1,37E+09; 49269; 4519)	(42341; -131,52; 1,098; 4,75E+11; 8,71E+10; 49449; 4433)	(42340; -131,21; 1,094; 2,80E+13; 5,50E+12; 49566; 4366)	(42336; -130,96; 1,090; 1,66E+15; 3,47E+14; 49648; 4316)	(42332; -130,75; 1,086; 9,98E+16; 2,19E+16; 49708; 4277)	(42333; -130,58; 1,081; 6,03E+18; 1,38E+18; 49755; 4246)	(42535; -130,23; 1,038; 4,74E+36; 1,34E+36; 50080; 4099)	(42949; -130,94; 0,995; 4,04E+72; 1,29E+72; 50446; 4033)
0,8	(43755; -145,35; 1,178; 46949; 6495; 46949; 6495)	(42199; -133,13; 1,110; 2,59E+06; 3,50E+05; 48273; 4968)	(42378; -133,25; 1,128; 1,44E+08; 2,27E+07; 48933; 4762)	(42436; -132,92; 1,124; 8,18E+09; 1,46E+09; 49246; 4628)	(42436; -132,46; 1,117; 4,74E+11; 9,27E+10; 49428; 4525)	(42421; -132,02; 1,110; 2,79E+13; 5,86E+12; 49547; 4447)	(42405; -131,67; 1,105; 1,66E+15; 3,70E+14; 49629; 4387)	(42394; -131,39; 1,099; 9,95E+16; 2,34E+16; 49691; 4341)	(42388; -131,16; 1,094; 6,01E+18; 1,48E+18; 49738; 4304)	(42557; -130,53; 1,046; 4,72E+36; 1,45E+36; 50065; 4132)	(42944; -130,97; 0,997; 4,03E+72; 1,33E+72; 50439; 4039)
1	(43755; -145,35; 1,178; 46949; 6495; 46949; 6495)	(42346; -134,76; 1,146; 2,58E+06; 3,68E+05; 48214; 5137)	(42497; -134,43; 1,152; 1,44E+08; 2,38E+07; 48911; 4877)	(42534; -133,87; 1,143; 8,17E+09; 1,53E+09; 49227; 4721)	(42517; -133,25; 1,133; 4,74E+11; 9,76E+10; 49410; 4604)	(42491; -132,72; 1,124; 2,79E+13; 6,19E+12; 49530; 4516)	(42466; -132,29; 1,117; 1,66E+15; 3,92E+14; 49614; 4449)	(42448; -131,95; 1,111; 9,94E+16; 2,48E+16; 49675; 4397)	(42438; -131,68; 1,105; 6,00E+18; 1,57E+18; 49725; 4356)	(42573; -130,78; 1,053; 4,72E+36; 1,55E+36; 50051; 4160)	(42951; -131,10; 1,001; 4,03E+72; 1,44E+72; 50430; 4054)

автомобилей, снижает спрос на железнодорожные перевозки. Переменная x_2 оказывает прямое влияние на y : чем выше цены на полеты в самолетах, тем ниже спрос на авиаперевозки, и тем выше спрос на железнодорожные перевозки.

Заключение

В работе предложен метод множественного L_p -оценивания неизвестных параметров линейной регрессии. В результате оценивания формируется множество различных оценок линейной регрессии. Вопросы выбора из этого множества оценок с наилучшими свойствами будут исследованы в дальнейших работах авторов.

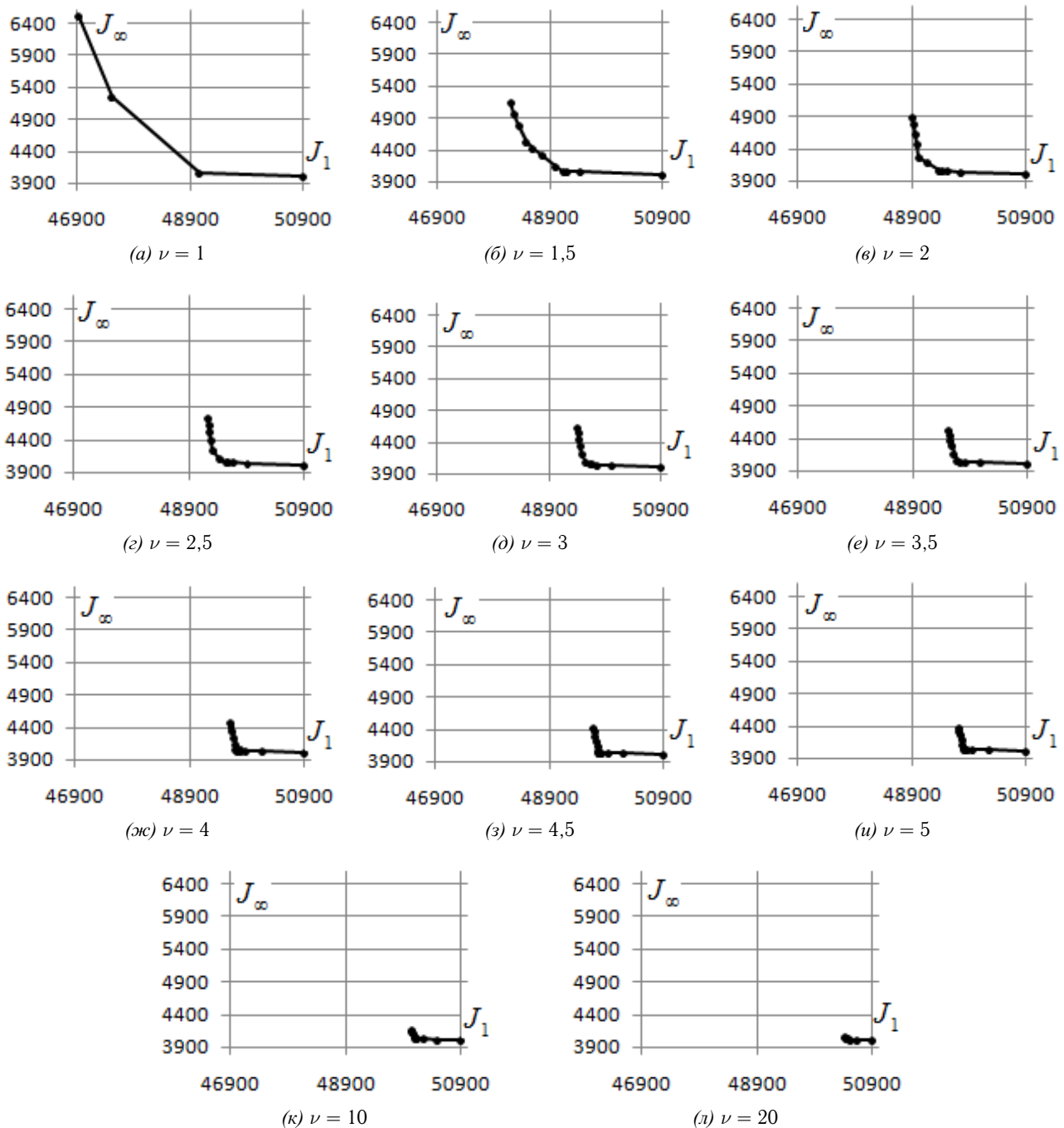


Рис. Вершины Парето для разных ν в критериальном пространстве (J_1, J_∞)

ЛИТЕРАТУРА

1. Brook R. J., Arnold G. C. *Applied Regression Analysis and Experimental Design*. CRC Press; 2018.
2. Lawrence K. D. *Robust Regression: Analysis and Applications*. Routledge; 2019.
3. Mahanty C., Kumar R., Mishra B. K. Analyses the Effects of COVID-19 Outbreak on Human Sexual Behaviour Using Ordinary Least-Squares Based Multivariate Logistic Regression. *Quality & Quantity*. 2021;55(4):1239–1259. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11135-020-01057-8>.
4. Aloisio A., Alaggio R., Fragiaco M. Dynamic Identification of a Masonry Façade from Seismic Response Data Based on an Elementary Ordinary Least Squares Approach. *Engineering Structures*. 2019;197:109415. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029618322697>.
5. Huber P. J. Robust Estimation of a Location Parameter. *Breakthroughs in Statistics*. 1992:492–518.
6. Wilcox R. R. *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing*. Academic Press; 2011.

7. Bloomfield P., Steiger W. L. *Least Absolute Deviations: Theory, Applications, and Algorithms*. Boston: Birkhäuser; 1983.
8. Носков С. И. *Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных*. Иркутск: Облформпечать; 1996.
9. Демиденко Е. З. *Линейная и нелинейная регрессии*. М.: Финансы и статистика; 1981.
10. Fletcher R., Grant J. A., Hebden H. D. The Calculation of Linear Least L_p -approximations. *Computer Journal*. 1971;14(3).
11. Мудров В. И., Кушко В. Л. *Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки*. М.: Радио и связь; 1983.
12. Носков С. И., Базилевский М. П. Множественное оценивание параметров и критерий согласованности поведения в регрессионном анализе. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;4(135):101–110.
13. Носков С. И., Баенхаева А. В. Множественное оценивание параметров линейного регрессионного уравнения. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016;3(51):133–138.
14. Баенхаева А. В., Базилевский М. П., Носков С. И. Программный комплекс множественного оценивания регрессионных моделей. *Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем*. 2016;17:38–44.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-05

МЕТОДОЛОГИЯ КОСВЕННОГО МОНИТОРИНГА НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ АКТИВНОСТИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

К. И. Бушмелева, А. В. Гавриленко, А. В. Никифоров^a

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ✉ nikiforov_av@surgu.ru

Аннотация: в статье описаны недостатки существующих средств противодействия несанкционированной активности и возможность их устранения посредством методологии косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах. Разобраны проблемы применения математического ожидания, дисперсии и стандартного отклонения при расчете граничных значений косвенных параметров и предложено решение, которое основано на использовании выборочного среднего, выборочной дисперсии и выборочного стандартного отклонения для проведения данных расчетов. Помимо расчета граничных значений косвенных параметров, в статье описывается метод прогнозирования объема выборки, который основывается на частоте сбора косвенных параметров вычислительной системы и времени ее работы. Граничные значения косвенных параметров, предельные значения косвенных параметров, прогнозируемый объем выборки и другие расчетные показатели, предусмотренные методологией, образуют множество показателей, описывающих нормальную работу вычислительной системы. Наличие данного множества позволяет определить кусочную функцию проверки косвенных параметров вычислительной системы на нормальное состояние. Следовательно, возможно представить вычислительную систему в виде предиката. Данный предикат и множество показателей лежат в основе шаблона, описывающего выбранную вычислительную систему. Полученный шаблон и сценарии его применения являются базой для архитектуры системы косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах.

Ключевые слова: методология, мониторинг, несанкционированная активность, вычислительные системы, косвенные параметры.

Для цитирования: Бушмелева К. И., Гавриленко А. В., Никифоров А. В. Методология косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):41–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-05.

INDIRECT MONITORING OF SUSPICIOUS ACTIVITY ON COMPUTER SYSTEMS

K. I. Bushmeleva, A. V. Gavrilenko, A.V. Nikiforov^a

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ✉ nikiforov_av@surgu.ru

Abstract: this study conspires the drawbacks of the existing fraud detection tools and offers a solution: indirect monitoring of suspicious activity on computer systems. We applied the expected value, variance, and standard deviation concepts to estimate the thresholds of indirect indicators of compromise and derived a solution based on the selective mean, selective variance, and selective standard deviation. The paper also describes a sample size estimation procedure from the computer system's indirect indicator sampling rate and runtime. The thresholds of the indirect indicators, the estimated sample size, and other proposed indicators describe the normal operation of the computer system. With this set of indicators, we can define a piecewise function used to check the indirect indicators against the normal operation conditions. Consequently, the computer system can be represented as a predicate. The predicate and the set of indicators are a template describing the computer system. The resulting template and its application scenarios provide a foundation for developing the architecture of an indirect suspicious activity monitoring tool.

Keywords: methodology, monitoring, suspicious activity, computer systems, indirect indicators of compromise.

Cite this article: Bushmeleva K. I., Gavrilenko A. V., Nikiforov A.V. Indirect Monitoring of Suspicious Activity on Computer Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):41–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-05.

Введение

Одной из проблем современных вычислительных систем является несанкционированная активность. Причины появления несанкционированной активности в вычислительных системах имеют различную природу возникновения [1–6]. Определение наличия несанкционированной активности рядовыми пользователями в вычислительных системах без специальных средств невозможно, т. к. для этого необходимо обладать достаточно высокой квалификацией. Существующие специальные средства по большей части нацелены на противодействие вредоносному программному обеспечению. Уязвимостям и неисправностям аппаратного обеспечения вычислительных систем уделяется намного меньше внимания.

Методология косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах, описанная в данной статье, направлена на решение проблем, связанных с несанкционированной активностью вне зависимости от природы ее возникновения. Эта методология опирается на мониторинг не прямых, а косвенных параметров работы вычислительной системы [7]. Прямыми являются частота процессора, количество ядер процессора, объем кеша процессора и т. д. Косвенными параметрами вычислительной системы являются температура процессора, скорость вращения вентилятора системы охлаждения, уровень электромагнитного поля и т. д. Существующие специальные средства работают именно с прямыми параметрами вычислительной системы, но все чаще злоумышленники подделывают их с целью сокрытия несанкционированной активности. Использование описанной в статье методологии позволяет избежать проблем, связанных с достоверностью прямых параметров работы вычислительной системы.

Методология косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах

Суть описанной методологии заключается в наблюдении за параметрами, которые оказывают косвенное воздействие на вычислительные процессы, происходящие в вычислительных системах. Каждый элемент вычислительной системы имеет определенное количество косвенных параметров, которые можно использовать при оценивании состояния вычислительной системы.

Обозначим множество всех значений некоторого косвенного параметра любого элемента вычислительной системы буквой P [8].

$$P = \{x_1, \dots, x_n\}, \quad x_n \in R, 1 \leq n \leq m, \quad (1)$$

где m — максимально возможное количество значений косвенного параметра.

Из определения множества P , описанного формулой (1), следует, что оно является генеральной совокупностью некоторого косвенного параметра. Следовательно, можно рассчитать следующие базовые математические и статистические показатели, которые помогут оценить состояние вычислительной системы [9]:

- 1) минимальное значение;
- 2) максимальное значение;
- 3) математическое ожидание;
- 4) дисперсия;
- 5) стандартное отклонение.

$$\begin{cases} \varepsilon_{left} = \mu - c_\sigma * \sigma \\ \varepsilon_{right} = \mu + c_\sigma * \sigma \end{cases}, \quad c_\sigma \in R, \varepsilon_{left} \in R, \varepsilon_{right} \in R, \quad (2)$$

где ε_{left} — это левое граничное значение некоторого косвенного параметра;

ε_{right} — это правое граничное значение некоторого косвенного параметра;

μ — это математическое ожидание некоторого косвенного параметра;

c_σ — это математическое ожидание количества стандартных отклонений, при котором вычислительная система находится в нормальном состоянии;

σ — это стандартное отклонение некоторого косвенного параметра.

Имея значения данных показателей и воспользовавшись формулой (2), можно рассчитать на множестве P граничные значения, при которых вычислительная система функционирует в нормальном состоянии.

$$\begin{cases} \varepsilon_{left\ lim} = \min P \\ \varepsilon_{right\ lim} = \max P \end{cases}, \quad \varepsilon_{left\ lim} \in P, \varepsilon_{right\ lim} \in P, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{left\ lim}$ — это предел левого граничного значения некоторого косвенного параметра;

$\varepsilon_{right\ lim}$ — это предел правого граничного значения некоторого косвенного параметра.

Также, воспользовавшись формулой (3), можно найти пределы левого и правого граничных значений.

$$\begin{cases} \varepsilon_{left\ norm} = \varepsilon_{left} * 10^n \\ \varepsilon_{right\ norm} = \varepsilon_{right} * 10^n \\ \varepsilon_{left\ lim\ norm} = \varepsilon_{left\ lim} * 10^n \\ \varepsilon_{right\ lim\ norm} = \varepsilon_{right\ lim} * 10^n \end{cases}, \quad n \in N, 1 \leq n \leq m, \quad (4)$$

где m — максимальное количество разрядов, которое переносится в целую часть числа.

Отдельного внимания требуют косвенные параметры, значения которых никогда не достигают целой части. Например, напряжение питания процессора или чипсета. Поэтому граничные значения таких косвенных параметров нормализуются при помощи формулы (4).

Процедура нормализации значений косвенных параметров требуется для увеличения производительности расчетов на вычислительных системах, т. к. вычисления с использованием целых чисел осуществляются быстрее. В остальных случаях процедура нормализации является опциональной.

Однако описанный выше метод, основанный на использовании граничных значений косвенного параметра, имеет две существенные проблемы:

- 1) по причине сложных взаимосвязей между косвенными и прямыми параметрами вычислительной системы невозможно получить все значения множества P и, как следствие, рассчитать базовые статистические показатели для реальной вычислительной системы;
- 2) отсутствие базовых статистических показателей делает невозможным расчет c_σ , т. к. базовые статистические показатели лежат в основе процедуры расчета.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) = \mu \quad (5)$$

Решением данных проблем является переход от базовых статистических показателей к эквивалентным, а именно выборочному среднему, выборочной дисперсии и выборочному стандартному отклонению. Возможность эквивалентного перехода доступна благодаря пределу, описанному в формуле (5) [9].

$$\begin{cases} \varepsilon_{left} = \bar{x} - c_{sd} * sd \\ \varepsilon_{right} = \bar{x} + c_{sd} * sd \end{cases}, \quad c_{sd} \in R \quad (6)$$

Функция, предел которой равен математическому ожиданию, является ни чем иным, как формулой расчета выборочного среднего. Следовательно, граничные значения рассчитываются по обновленной формуле (6).

$$c_{sd} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{x} - x_i|}{sd}, \quad (7)$$

где n — количество элементов в выборке.

Значение переменной c_{sd} , которая является заменой c_σ , рассчитывается по формуле (7).

$$\begin{cases} \varepsilon_{left} = \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{x} - x_i|}{sd} \\ \varepsilon_{right} = \bar{x} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{x} - x_i|}{sd} \end{cases} \quad (8)$$

Если объединить формулы (6) и (7), получится формула (8).

$$n = \sum_{i=1}^m \nu_i * T_i, \quad n \in N, \quad \nu_i \in N, \quad T_i \in N, \quad 1 \leq n \leq k, \quad (9)$$

где ν_i — частота сбора значений косвенного параметра вычислительной системы;

T_i — период работы вычислительной системы;

k — максимальное количество периодов, на которых проводится сбор значений косвенного параметра вычислительной системы.

Опираясь на формулы (5) и (8), можно сделать вывод, что расчетные граничные значения будут наиболее близкими к действительным, если максимизировать количество элементов в выборке. Поэтому, воспользовавшись формулой (9), можно рассчитать количество элементов в выборке за определенный период времени работы вычислительной системы.

Формула (9) позволяет не только рассчитать, но и спрогнозировать количество элементов в выборке. Пополнение количества элементов в выборке осуществляется при помощи датчиков, отслеживающих значения косвенных параметров. Датчики, применяемые при отслеживании значений косвенных параметров, бывают встроенные и внешние. Большинство современных элементов, из которых состоят вычислительные системы, имеет встроенные датчики (датчики измерения температуры и скорости вращения вентиляторов системы охлаждения). Использование внешних датчиков при пополнении выборки значениями является минимальным.

$$M = \{n, \bar{x}, sd, c_{sd}, \varepsilon_{left}, \varepsilon_{right}, \varepsilon_{left\ lim}, \varepsilon_{right\ lim}\} \quad (10)$$

Все полученные ранее расчетные показатели образуют множество M , которое позволяет оценить некоторый косвенный параметр. Данное множество описывается формулой (10).

$$\varepsilon_{state} = vlim(x) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{left} \leq x \leq \varepsilon_{right} \\ 1, & \varepsilon_{left} < x \leq \varepsilon_{left\ lim} \\ 1, & \varepsilon_{right} < x \leq \varepsilon_{right\ lim} \end{cases}, \quad x \in P, \varepsilon_{state} \in B \quad (11)$$

В итоге множества P и M позволяют описать следующую кусочную функцию из формулы (11).

$$\varepsilon_{state}^{(1)} \wedge \varepsilon_{state}^{(2)} \wedge \dots \wedge \varepsilon_{state}^{(n)}, \quad 1 \leq n \leq m, \quad (12)$$

где m — максимальное количество косвенных параметров элементов, из которых состоит вычислительная система.

Эта кусочная функция показывает, находится некоторый косвенный параметр в нормальном состоянии или нет. Опираясь на вышесказанное, можно произвести описание вычислительной системы в виде предиката, который позволит определять состояние системы на основе состояния косвенных параметров ее элементов. Описанный выше предикат представлен в формуле (12).

Наличие предиката, описывающего вычислительную систему и множества M , делает возможным создание шаблона любой вычислительной системы. Этот шаблон позволяет осуществлять мониторинг вычислительной системы в процессе ее работы. Следовательно, становится возможным определить наличие несанкционированной активности в вычислительной системе, что позволит своевременно принимать меры по противодействию.

Рассмотрим применение методологии косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах для всех возможных сценариев:

1. Вычислительная система не имеет шаблона, и база данных шаблонов пустая. Тогда производится первичный сбор статистики для косвенных параметров вычислительной системы. Далее на основе полученной статистики создается шаблон, который записывается в базу данных. После чего запускается процесс мониторинга вычислительной системы.

2. Вычислительная система не имеет шаблона, и база данных шаблонов не пустая. Тогда производится поиск наиболее подходящего временного шаблона из базы данных. Далее запускается процесс мониторинга вычислительной системы. После чего параллельно процессу мониторинга запускается сбор статистики для косвенных параметров вычислительной системы с целью создания шаблона данной вычислительной системы.

3. Вычислительная система имеет шаблон, и база данных шаблонов не пустая. Тогда производится поиск шаблона данной вычислительной системы в базе данных. После чего запускается процесс мониторинга вычислительной системы.

Все описанные выше сценарии сводятся к запуску процесса мониторинга вычислительной системы вне зависимости от различий на предыдущих этапах. Однако общим для всех сценариев является периодическая корректировка шаблонов на основе собираемой статистики, сбор которой продолжается параллельно процессу мониторинга. Это делается с целью создания наиболее точного шаблона, описывающего вычислительную систему.

Описанная выше методология, основанная на создании шаблона и сценариях его применения, легла в основу архитектуры системы косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах [10].

Заключение

Представленная методология косвенного мониторинга несанкционированной активности в вычислительных системах позволяет обнаруживать несанкционированную активность вне зависимости от природы ее возникновения. Созданная на основе методологии система значительно облегчает обнаружение несанкционированной активности как специалистами, так и рядовыми пользователями. Данный факт позволяет своевременно принять все необходимые меры по противодействию и увеличивает шансы сохранения вычислительной системы в рабочем состоянии.

В дальнейшем планируется апробация полученной методологии и системы на вычислительных машинах действующей организации или предприятия для получения отзывов рядовых пользователей и специалистов. Апробация позволит выявить недочеты предложенной методологии и недоработки созданной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев А. Н. Подход к обнаружению вредоносного программного обеспечения web-shell на основе анализа сетевого трафика web-инфраструктуры. *Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2021;677:143–152.
2. Саенко М. А., Шепель Д. П. Аппаратная безопасность, уязвимости и атаки: всеобъемлющая таксономия. *Вопросы устойчивого развития общества*. 2022;6:1294–1302.
3. Спиридонов С. Б., Чертилин А. А., Черненький М. В. и др. Аппаратные уязвимости современных процессоров, вызванные спекулятивным исполнением инструкций, и методы их исправления. *Естественные и технические науки*. 2018;5:270–273.
4. Бабенко Л. К., Кириллов А. С. Разработка автоматизированной системы обнаружения вредоносного программного обеспечения. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021;7:153–167.
5. Сахно В. В., Проказова Ж. В. Анализ вредоносного программного обеспечения. *Modern Science*. 2021;9(2):226–229.
6. Pham D.-P., Marion D., Mastio M. et al. *Obfuscation Revealed: Leveraging Electromagnetic Signals for Obfuscated Malware Classification*. France: HAL archives ouvertes; 2021. 14 p. DOI: 10.1145/3485832.3485894.
7. Бушмелева К. И., Гавриленко А. В., Никифоров А. В. *Использование инверсии управления и внедрения зависимостей в архитектуре системы косвенного мониторинга несанкционированной активности*. М: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского; 2020. 472 с.
8. Вечтомов Е. М., Широков Д. В. *Математика: логика, теория множеств и комбинаторика*. Юрайт; 2022.
9. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Юрайт; 2022.
10. Бушмелева К. И., Гавриленко А. В., Никифоров А. В. Информационная система косвенного мониторинга несанкционированной активности в компьютерных системах. *Вестник кибернетики*. 2021;4:16–21.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ МИССИЙ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**А. В. Мальцев^а, П. Ю. Тимохин^б, Е. В. Страшнов^в***Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, avmaltcev@mail.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0718-1436>, webpismo@yahoo.de^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, strashnov_evg@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается задача виртуального моделирования процесса управления пилотируемым космическим кораблем в рамках исследовательских миссий по освоению лунной поверхности, предполагающих выполнение посадки на нее. Данная задача является актуальной ввиду необходимости изучения естественного спутника Земли в ближней и среднесрочной перспективе. Разработанные решения основаны на применении современных технологий виртуальной реальности, когда окружающая человека среда полностью заменяется на виртуальный прототип. Рассматривается предлагаемая для решения поставленной задачи структура системы виртуального окружения, которая включает в себя аппаратный блок, программный комплекс и цифровые модели. Моделирование движения и посадки виртуального прототипа космического корабля осуществляется путем расчета сил тяги реактивных двигателей и основано на синтезе оптимального управления с реализацией критериев быстрого действия (для переориентации корабля) и минимального расхода топлива (для торможения корабля). При этом разработанное управление формируется в виде обратной связи по показаниям виртуальных датчиков и обеспечивает стабилизацию, переориентацию, торможение и мягкую посадку космического корабля на поверхность Луны. Моделирование лунной поверхности выполняется на графическом процессоре с использованием детализированных текстур Луны и адаптивной триангуляции сетки высот. Апробация показала адекватность предложенных решений поставленной задаче и их применимость при реализации современных видеотренажеров подготовки космонавтов.

Ключевые слова: пилотируемый космический корабль, Луна, мягкая посадка, система виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИ-СИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2022-0012 «Системы виртуального окружения: технологии, методы и алгоритмы математического моделирования и визуализации. 0580-2022-0012».

Для цитирования: Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В. Моделирование виртуального окружения для пилотируемых миссий по исследованию лунной поверхности. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06.

SIMULATION OF VIRTUAL ENVIRONMENT FOR CREWED LUNAR MISSIONS**A. V. Maltsev^a, P. Yu. Timokhin^b, E. V. Strashnov^c***Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, avmaltcev@mail.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0718-1436>, webpismo@yahoo.de^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, strashnov_evg@mail.ru

Abstract: we studied the virtual simulation of a crewed spacecraft control for research missions to the Moon's surface. There is an obvious need to survey the Moon in the short and medium term. The solutions are based on advanced VR: the environment is completely replaced by a virtual one. We proposed an architecture of a virtual environment system consisting of hardware, software, and digital models. The motion and landing of a virtual spacecraft are simulated by estimating the jet engine thrust. The control inputs are optimized for fast response (spacecraft orientation) and min fuel consumption (for deceleration).

The control logic is supported with feedback from virtual sensors to stabilize, orient, decelerate, and perform a soft landing on the Moon. The moon's surface is simulated by a GPU using detailed Moon textures and adaptive triangulation of the terrain grid. The proposed solution is suitable to build video simulators for space crew training.

Keywords: crewed spacecraft, Moon, soft landing, virtual environment.

Acknowledgements: the study is a part of the 47 GP government contract for basic research with the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences No. FNEF-2022-0012 Virtual Environment Systems: Technologies, Methods, and Algorithms for Simulation and Visualization. 0580-2022-0012.

Cite this article: Maltsev A. V., Timokhin P. Yu., Strashnov E. V. Simulation of Virtual Environment for Crewed Lunar Missions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06.

Введение

В настоящее время ведется активное исследование и освоение космоса. В том числе разрабатываются планы по проведению как беспилотных, так и пилотируемых миссий для изучения Луны. Поэтому важной и актуальной задачей является обучение космонавтов таким необходимым навыкам, как управление космическим кораблем.

Интенсивно развивающимся направлением в области создания тренажерных и обучающих систем в последние годы стало применение в них технологий виртуальной реальности (VR) [1, 2]. Такой подход подразумевает замену реальных объектов на виртуальные прототипы и выполнение тренировки путем погружения оператора в виртуальную среду. Существенную роль играет применение VR-технологий в тренажерных комплексах космической тематики, поскольку это позволяет улучшить качество визуального восприятия для тех задач и операций, которые невозможно реализовать в земных условиях [3]. В качестве примеров могут выступать тренажеры для обучения космонавтов выходу в открытый космос [4], выполнению задач в условиях внекорабельной деятельности [5], а также решения на базе VR-технологий, применяемые в лаборатории НАСА [6].

В данной работе предлагаются методы и подходы к реализации тренажера обучения космонавтов навыкам управления пилотируемым космическим кораблем (ПКК) вблизи лунной поверхности и в процессе посадки на нее, основанные на применении VR-технологий и разработанной системы виртуального окружения. Новизна работы заключается в том, что управление моделью корабля осуществляется путем взаимодействия реального человека с элементами виртуального трехмерного пульта управления, размещенного в ее интерьере. Для этого была создана специальная модель виртуального наблюдателя, движения рук которого повторяют движения реальных рук оператора. Предлагаемое решение включает оригинальную структуру системы виртуального окружения, методы моделирования динамики и полуавтоматического управления виртуальным прототипом ПКК (переориентация и торможение — в автоматическом режиме, выбор места посадки — в ручном), а также методы построения и визуализации лунной поверхности. Апробация предложенных в статье методов была проведена в разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН системе виртуального окружения VirSim [7] и продемонстрировала их применимость при создании космических тренажерных систем на основе VR-технологий.

Структура системы виртуального окружения

Система виртуального окружения (СиВО), созданная в рамках данной работы для решения задачи обучения космонавтов управлению космическим кораблем при выполнении пилотируемых миссий по исследованию лунной поверхности, включает аппаратный блок, программный комплекс и цифровые визуальные модели (ЦВМ). На рис. 1 проиллюстрирована общая структура предлагаемой системы.

Аппаратный блок, реализуемый на базе VR-гарнитуры Oculus Rift CV1 и контроллеров Oculus Touch, осуществляет трекинг головы и рук оператора, а также отображение синтезируемой стереопары в его глаза. Разработанный программный комплекс состоит из нескольких подсистем, объединенных общей оболочкой и отвечающих за управление виртуальными объектами, моделирование их динамики и визуализацию виртуальной среды. Основными функциями оболочки являются обеспечение обмена данными между подсистемами по специальным протоколам и предоставление пользователю визуального интерфейса взаимодействия с комплексом. Подсистема управления собирает информацию от внешних устройств, входящих в аппаратный блок. Также в нее передаются показания датчиков о состоянии

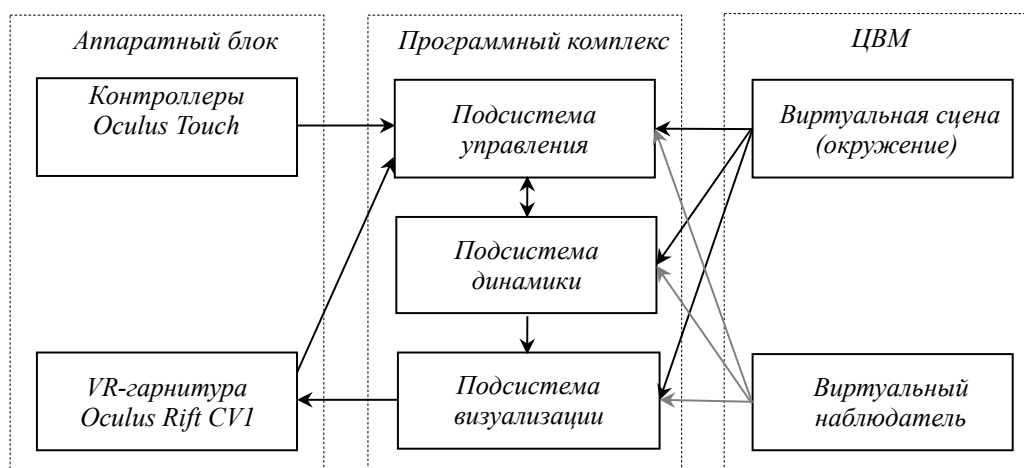


Рис. 1. Виртуальная модель ПКК (экстерьер и интерьер)

виртуальных элементов управления (кнопок, тумблеров, джойстиков и т.д.), являющихся частями ЦВМ. На базе поступающей информации выполняется расчет функциональных схем управления динамическими объектами виртуальной среды и синтез управляющих сигналов [8]. Функциональные схемы входят в состав ЦВМ и загружаются в подсистему управления при инициализации СиВО. Синтезированные сигналы направляются в подсистему динамики, отвечающую за определение новых положений и ориентаций объектов виртуальной среды, а также определение и обработку коллизий между ними. Подсистема визуализации выполняет рендеринг стерео изображений виртуальной среды и передает их на отображение в VR-гарнитуру Rift, входящую в состав аппаратного блока. Распределенная визуализация стереопары с моделированием реалистичной освещенности выполняется на многоядерном графическом процессоре (GPU) в масштабе реального времени, т. е. с частотой смены кадров не менее 25 раз в секунду.

Созданная в данном исследовании ЦВМ содержит высокодетализированную виртуальную сцену окружения космонавта, включающую модели ПКК (рис. 2) и Луны, а также модель виртуального наблюдателя. Последний является неким аватаром обучаемого оператора, позволяющим осуществлять погружение в виртуальную среду и взаимодействие с ней. Предлагаемая модель виртуального наблюдателя представляет собой совокупность двух виртуальных камер и моделей человеческих рук. Камеры являются глазами оператора в виртуальной среде. Визуализированные с их помощью изображения трехмерной сцены отображаются в глаза человека посредством VR-гарнитуры. Положения и ориентация камер рассчитываются на основе данных о положении и ориентации головы оператора, поступающих с датчиков гарнитуры. Возможность воздействия наблюдателя на объекты сцены реализуется с помощью созданных нами виртуальных моделей кистей рук, управление которыми осуществляется посредством пары контроллеров Oculus Touch. Они копируют движения кистей рук оператора и позволяют сгибать и разгибать виртуальные пальцы.

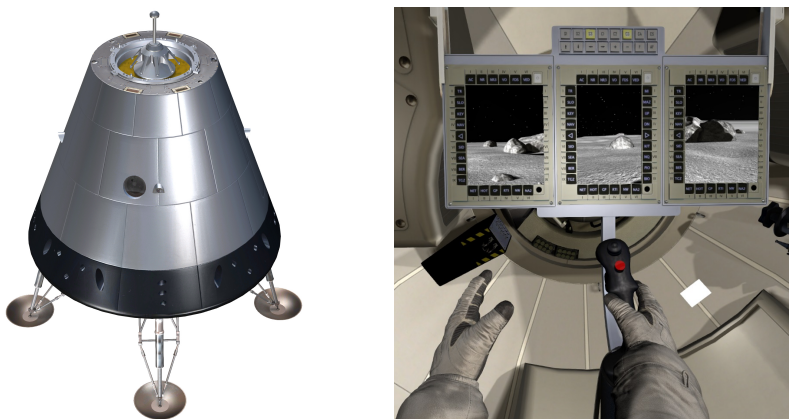


Рис. 2. Виртуальная модель ПКК (экстерьер и интерьер)

Помимо геометрии, виртуальные руки включают описывающие эту геометрию неотображаемые ограничивающие объемы (параллелепипеды, сферы, цилиндры и т. д.). Взаимодействия моделей рук с объектами сцены моделируются путем поиска и обработки коллизий между ограничивающими объемами рук и этих объектов. Чтобы обеспечить возможность управления движением и посадкой модели ПКК, в интерьере этой модели размещен трехмерный виртуальный пульт управления с кнопками, джойстиком и экранами. Оператор может воздействовать на элементы данного пульта с помощью рук виртуального наблюдателя. Управление виртуальным наблюдателем и моделью корабля реализуется на основе специально разработанных для этого функциональных схем.

Моделирование динамики и управление космическим кораблем

Созданная нами СиВО позволяет реализовать динамику и управление виртуальной моделью ПКК для его посадки на модель поверхности Луны. Движение ПКК осуществляется под действием реактивных двигателей, которые создают тягу вида

$$f_i = \beta_i \dot{f}_{nom,i} = \beta_i k_{nom,i} v_h, \quad i = \overline{1, N},$$

где для каждого двигателя $0 \leq \beta_i \leq 1$ — коэффициент дросселирования, $\dot{f}_{nom,i}$ — номинальное значение силы тяги, $k_{nom,i}$ — номинальный расход топлива, v_h — скорость истечения газов, N — число двигателей ПКК. Здесь $\beta_i = 1$ соответствует непрерывному режиму работы двигателя, $\beta_i \in (0, 1)$ — импульсному режиму, $\beta_i = 0$ — состоянию, когда двигатель не работает.

Действие реактивных двигателей приводит к тому, что формируется суммарная сила тяги $\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N f_i \mathbf{n}_i$ и суммарный момент $\boldsymbol{\tau} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \times f_i \mathbf{n}_i$, где $\mathbf{n}_i$ — вектор оси направления действия тяги двигателя, $\mathbf{r}_i$ — положение двигателя относительно центра масс ПКК. Если рассматривать ПКК как твердое тело, то динамика его поступательного и вращательного движения описывается с помощью дифференциальных уравнений Ньютона–Эйлера [9]:

$$m\dot{\mathbf{v}} = m\mathbf{g}_l + \mathbf{F}, \quad \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\tau},$$

где m — масса ПКК, $\mathbf{I}$ — его тензор инерции, $\mathbf{v}$ и $\boldsymbol{\omega}$ — его линейная и угловая скорость, $\mathbf{g}_l$ — вектор ускорения свободного падения на Луне.

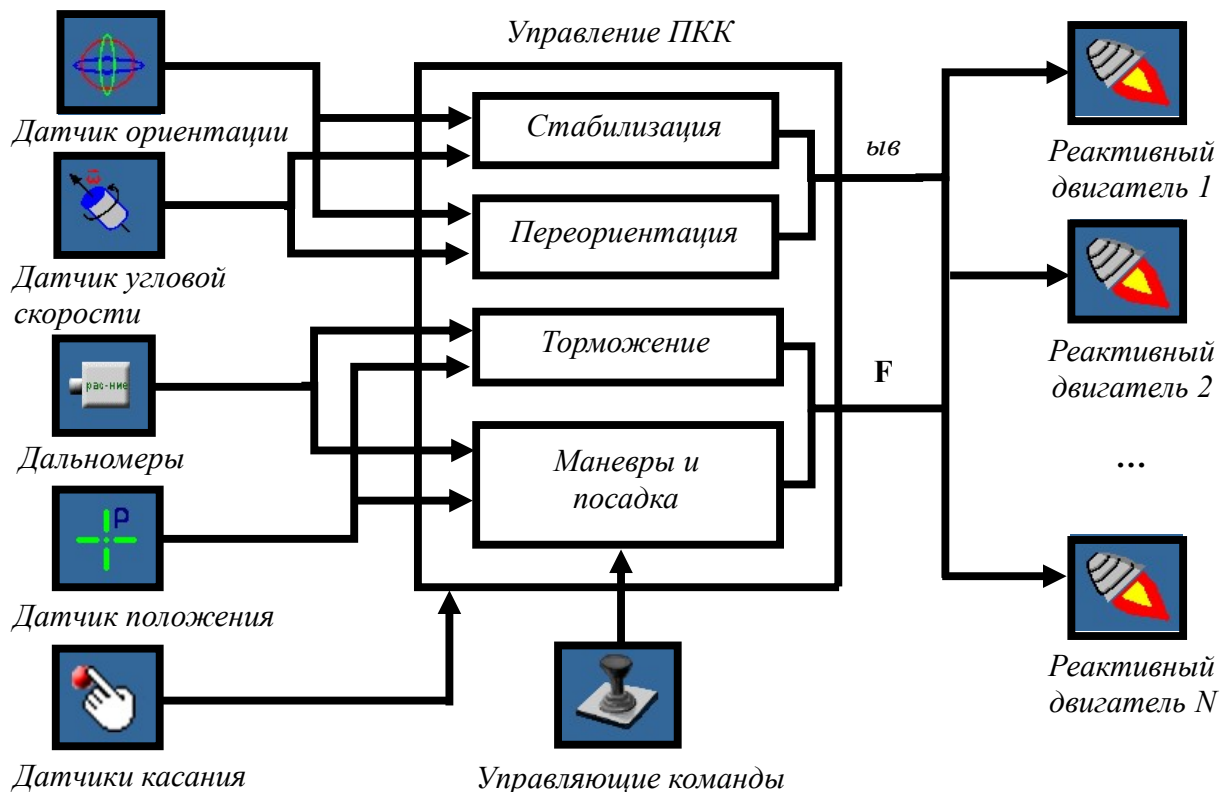


Рис. 3. Структура системы управления ПКК

Эти уравнения используются для вычисления новых координат модели ПКК (ее положения и ориентации). При этом положение модели ПКК задается относительно предполагаемого места посадки, а ориентация — тремя углами Эйлера. Для интегрирования дифференциальных уравнений движения ПКК используется полунявная схема Эйлера [10], в которой на каждом шаге моделирования сначала вычисляются скорости ПКК, а затем его координаты.

Управление ПКК в виртуальном окружении осуществляется с применением технологии создания и расчета функциональных схем [8]. Идея заключается в том, что алгоритм управления ПКК формируется в виде схемы, состоящей из набора связанных блоков, где входами являются показания виртуальных датчиков и управляющие команды, а на выходе вычисляются тяги реактивных двигателей. Предлагаемое решение для реализации посадки виртуальной модели ПКК на Луну основано на синтезе управления, оптимального по быстродействию при выполнении переориентации корабля и расходу топлива при его торможении. На рис. 3 приведена структура разработанной системы управления ПКК в виртуальном окружении, позволяющая реализовать стабилизацию, переориентацию, торможение, маневры и мягкую посадку ПКК на Луну в автоматическом и ручном режиме. Обратная связь в предлагаемой системе управления реализуется посредством виртуальных датчиков положения, ориентации, угловой скорости, касания и дальномеров, измеряющих высоту ПКК относительно модели поверхности Луны. В ручном режиме управление ПКК производится с помощью моделей виртуальных рук, которые воздействуют на объекты виртуального окружения внутри ПКК (кнопки пульта и джойстик). Изменение состояний этих объектов приводит к формированию управляющих команд, поступающих в систему управления. В зависимости от показаний датчиков и управляющих команд вычисляются тяга и момент, согласно которым осуществляется включение и выключение соответствующих реактивных двигателей ПКК.

Моделирование полуавтоматического управления посадкой ПКК в СиВО начинается примерно на высоте 2 км относительно поверхности Луны и состоит из нескольких этапов. Сначала выполняется стабилизация (гашение угловой скорости) и вертикализация ПКК в автоматическом режиме. После этого ПКК свободно падает с набором скорости до достижения высоты 700 м. Затем начинается этап прецизионного торможения ПКК, который заключается в обеспечении требуемых значений горизонтальной и вертикальной скорости ПКК. Торможение продолжается до высоты 100 м, после чего ПКК зависает относительно поверхности Луны. На этом этапе оператор в ручном режиме осуществляет управление горизонтальным движением ПКК для выбора подходящего места посадки. Как только такое место найдено, оператор нажатием на кнопку виртуального пульта задает команду для выполнения мягкой посадки ПКК на поверхность Луны. При соприкосновении опор ПКК с поверхностью Луны срабатывают датчики касания, и реактивные двигатели отключаются.

Моделирование лунной поверхности

С высоты 2 км разрешение наблюдаемой поверхности Луны будет составлять около 1 м/пиксел и возрастать при посадке до значений порядка 1 см/пиксел. Создание виртуальной модели Луны с таким разрешением в традиционных системах типа 3ds Max имеет ряд ограничений, не позволяющих полностью решить задачу. Во-первых, это связано с большими размерами/объемом детализированных текстур Луны (карт-мозаик [11], составленных из спутниковых снимков), которые выходят за рамки аппаратных возможностей современных видеокарт. Во-вторых, это огромное число (миллионы) треугольников, которое производят системы типа 3ds Max при построении триангуляции протяженной поверхности Луны со сложным рельефом (с кратерами, бороздами, грядками и т.д.). Отправка такой «тяжелой» модели Луны на визуализацию может привести к блокированию работы СиВО, что недопустимо в тренировочном процессе.

Для решения описанной проблемы была разработана комбинированная виртуальная модель Луны, которая включает модель контактной площадки (КП) — участка Луны (около 200x200 м), в пределах которого отрабатывается посадка ПКК, а также модель окружающей лунной поверхности (ЛП), которую оператор наблюдает на экранах виртуального пульта в процессе снижения и посадки.

Основой модели КП является разработанная полигональная (триангулированная) модель участка лунного рельефа, в которой реализован комплекс мультитекстур [12], имитирующих детальные визуальные свойства реголита (поверхностного слоя сыпучего лунного грунта). Модель КП, как и модели ПКК и виртуального наблюдателя, создана с помощью системы 3ds Max на этапе подготовки виртуальной сцены и загружается целиком в видеопамять перед началом работы СиВО.

Моделирование и визуализация окружающей ЛП выполняются в масштабе реального времени непосредственно в процессе работы СиВО с помощью созданного программного модуля, входящего в состав подсистемы визуализации. Данный модуль позволяет синтезировать изображения модели ЛП с разрешением порядка 1 м/пиксел [13] в области, примыкающей непосредственно к КП (около 50 % от всей площади наблюдаемой ЛП), а в периферийных областях — с разрешением около 100 м/пиксел [14].

Моделирование геометрических свойств ЛП осуществляется на основе разработанной технологии адаптивной триангуляции детализированной регулярной сетки высот [15]. Идея состоит в том, что в видеопамять исходно загружается грубая полигональная модель ЛП, а на этапе синтеза текущего кадра у этой модели повышается полигональная детализация лишь в тех участках, где рельеф различим наблюдателем на экране. Это позволяет сократить на порядок число треугольников, отправляемых на визуализацию, и избежать эффекта передетализации изображения (когда в один пиксел отображается несколько точек модели). В предлагаемом решении моделирование ЛП реализовано полностью на GPU с помощью программируемой тесселяции (разбиения на подтреугольники) исходной модели. Новизна решения состоит в разработанной схеме повышения уровня полигональной детализации (см. рис. 4), основанной на оригинальной модификации аппаратного тесселяционного шаблона. Разработанная схема обеспечивает формирование безразрывной триангуляции, выровненной по узлам сетки высот.

Для моделирования визуальных свойств ЛП в данной работе используются тайлы (участки одинакового размера) исходной сверхбольшой текстуры Луны и ее уменьшенных копий (более низких уровней детализации). На этапе формирования кадра выполняется отбор тайлов, необходимых для визуализации, их подкачка в видеопамять и покрытие модели ЛП. Новизна технологии состоит в том, что отбор тайлов (включая определение их номеров и уровней детализации) выполняется полностью на GPU на основе параллельной обработки пикселей отображения модели ЛП. Это позволяет существенно сократить время построения текстурного рисунка ЛП, а также синтезировать качественные изображения ЛП, разрешение которых близко к разрешению средства наблюдения (см. рис. 5).

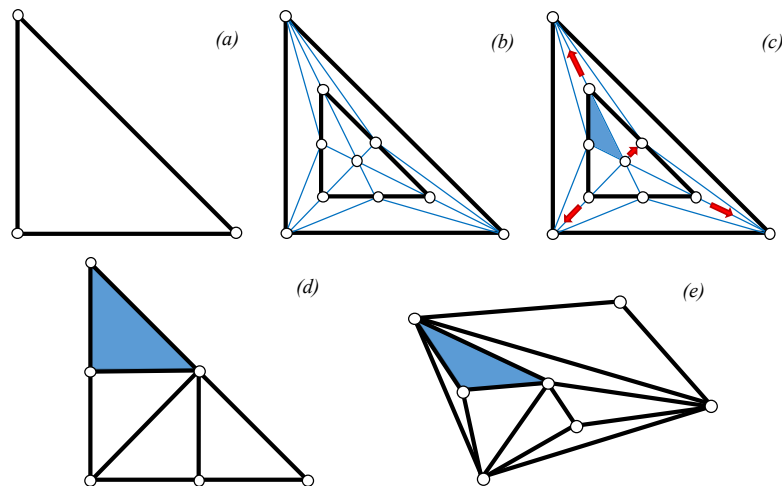


Рис. 4. Схема повышения уровня полигональной детализации: а) полигон i -го уровня детализации; б) тесселяционный шаблон; в) модификация шаблона; д) полигоны $(i+1)$ -го уровня детализации; е) стыковка полигонов i -го и $(i+1)$ -го уровней детализации

Заключение

В работе предложены методы и подходы для виртуального моделирования процесса управления космическим кораблем при выполнении пилотируемых миссий, предполагающих посадку на поверхность Луны. Использование VR-гарнитуры и контроллеров Oculus обеспечивает высокий уровень погружения оператора в виртуальную среду и тем самым повышает качество его обучения необходимым навыкам пилотирования ПКК. Успешная апробация полученных в статье решений в составе системы виртуального окружения VirSim показала возможность их применения при создании современных тренажерных комплексов подготовки космонавтов. На рисунке 6 продемонстрирована тренировка оператора управлению ПКК с применением описанных решений.

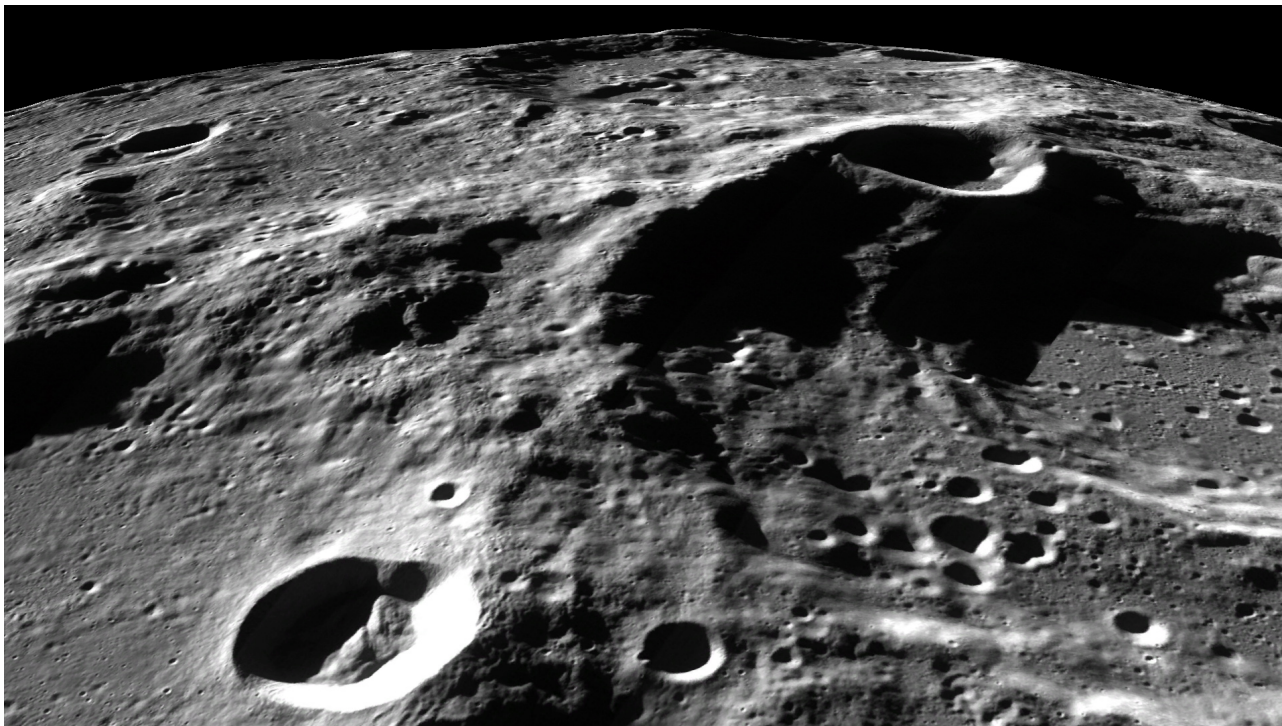


Рис. 5. Визуализация модели лунной поверхности



Рис. 6. Тренировка оператора с применением СиВО

ЛИТЕРАТУРА

1. Boletsis C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017;1(4):1–17. DOI: 10.3390/mti1040024.
2. Селиванов В. В., Селиванова Л. Н. Виртуальная реальность как метод и средство обучения. *Образовательные технологии и общество*. 2014;17(3):378–391.
3. Алтунин А. А., Долгов П. П., Жамалетдинов Н. Р., Иродов Е. Ю., Коренной В. С. Направления применения технологий виртуальной реальности при подготовке космонавтов к внекорабельной деятельности. *Пилотируемые полеты в космос*. 2021;1(38):72–88. DOI: 10.34131/MSF.21.1.72-88.
4. Liu Yuqing and others. VR Simulation System for EVA Astronaut Training. *Proceedings of AIAA Space 2010 Conference & Exposition*. Anaheim California, 2010. DOI: 10.2514/6.2010–8696.
5. Cater J. P., Huffman S. D. Use of the Remote Access Virtual Environment Network (RAVEN) for Coordinated IVA-EVA Astronaut Training and Evaluation. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. 1995;4(2):103–109. DOI: 10.1162/pres.1995.4.2.103.
6. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training Astronauts Using Hardware-in-the-Loop Simulations and Virtual Reality. *AIAA SciTech Forum*. Orlando, FL, 2020. DOI: 10.2514/6.2020-0167.
7. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
8. Михайлюк М. В., Торгашев М. А. Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов. *Программные продукты и системы*. 2014;4:10–15.
9. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Mechanics*. 2nd edition. *Course of Theoretical Physics*. Vol. 1. Pergamon Press; 1969.
10. Catto E. Iterative Dynamics with Temporal Coherence. *In Game Developer Conference*. 2005;1–24.
11. Scholten F., Oberst J., Matz K. D., Roatsch T., Wählich M., Speyerer E. J., Robinson M. S. GLD100: The Near-Global Lunar 100 m Raster DTM from LROC WAC Stereo Image Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2012;117:1–12. DOI: 10.1029/2011JE003926.
12. Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Трушин А. М. Методы распределенной визуализации виртуальных объектов с использованием мультитекстурирования на основе смешивания материалов. *Вестник кибернетики*. 2018;29(1):110–115.
13. *Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. North of Boguslawsky Crater DTM*. Режим доступа: https://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_DTM_BOGSLWSKY1.
14. *Astropedia. Lunar and Planetary Cartographic Catalog. Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100m v3*. Режим доступа: https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Moon/LRO/LROC_WAC/Lunar_LRO_LROC-WAC_Mosaic_global_100m_June_2013.
15. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Y., Maltsev A. V. A Method of Earth Terrain Tessellation on the GPU for Space Simulators. *Programming and Computer Software*. 2017;43(4):243–249. DOI: 10.1134/S0361768817040065.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-07

ОБ АДИАБАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ ИДЕАЛЬНОГО БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО ГАЗА В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**Д. А. Быковских¹, В. А. Галкин²**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5796-3786>, dmitriy.bykovskih@gmail.com² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Аннотация: статья посвящена поиску аналитического решения для задачи адиабатического сжатия бесстолкновительного газа в трехмерной области с подвижной и неподвижными границами. Представлен подробный вывод класса точных решений для этой задачи, суть которого заключается в определении плотности распределения молекул в пространстве координат и скоростей с течением времени. В отличие от одномерного случая, условия этой задачи такие, что пространство скоростей имеет кусочно-непрерывный вид, поэтому, чтобы вычислить макроскопические величины точного решения, необходимо интегрировать плотность распределения частиц по скоростям. Выполнено сравнение класса точных решений с результатами моделирования комплекса проблемно-ориентированных программ методом Монте-Карло. Статья содержит графики результатов сравнения аналитического и численного решения при различных скоростях подвижной стенки и различном количестве частиц, а также таблицы с максимальными оценками погрешностей макроскопических величин. Показано, что с увеличением числа частиц численное решение приближается к аналитическому. На PV -диаграмме продемонстрировано сравнение графиков адиабаты и аналитических решений при различных скоростях границы. Представлена оценка производительности разработанного комплекса программ. Полученный класс решений может быть использован для верификации комплексов программ.

Ключевые слова: адиабатическое сжатие газа, математическое моделирование, газодинамика, метод Монте-Карло.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № FNEF-2022-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления», рег. № 1021060909180-7-1.2.1.

Для цитирования: Д. А. Быковских, В. А. Галкин Об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в трехмерном пространстве. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):54–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-07.

ADIABATIC COMPRESSION OF IDEAL COLLISIONLESS GAS IN 3D SPACE**D. A. Bykovskikh¹, V. A. Galkin²**¹ Surgut State University, Surgut, Russian FederationORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5796-3786>, dmitriy.bykovskih@gmail.com² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian FederationORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Abstract: the purpose of this study is to find an analytical solution for the adiabatic compression of collisionless gas with movable and unmovable boundaries in 3D space. The paper presents a detailed inference of a class of exact solutions for determining the variation of molecular distribution density in the space/velocity space with time. In contrast to the 1D case, the velocity space is piecewise discontinuous. To calculate the macroscopic values of the exact solution, we should integrate the particle distribution density over the velocities. We also compared the class of exact solutions with the Monte Carlo simulation results. The paper contains curves that compare the analytical and numerical solutions for different moving wall

velocities and numbers of particles, and tables with max estimated errors for the macroscopic quantities. It is shown that as the number of particles increases, the numerical solution approaches the analytical one. The PV chart is used to compare the adiabatic and analytical solution curves at different boundary velocities. The software package performance is assessed. The class of solutions can be used to verify the software.

Keywords: adiabatic compression, simulation, gas dynamics, the Monte Carlo method.

Acknowledgements: this study is financially supported through a government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No. FNEF-2022-0007 Development of Distributed Systems and Computational Methods, Reg. No. 1021060909180-7-1.2.1.

Cite this article: D. A. Bykovskikh, V. A. Galkin Adiabatic Compression of Ideal Collisionless Gas in 3d Space. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):54–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-07.

Введение

В этой статье рассматривается задача об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в трехмерном пространстве с подвижной границей. Эта задача является продолжением работы [1], где представлены результаты исследования для одномерного случая.

Постановка задачи

Пусть в начальный момент времени в кубе равномерно распределены частицы. Их плотность внутри интервала равна $\rho_0 = \text{const}$. Вектор скорости каждой частицы определяется случайным образом с равномерным распределением на единичной сфере. Куб ограничен плоскостями (гранями), одна из которых движется внутрь с постоянной скоростью $\mathbf{u} = \{u_1, 0, 0\}$ вдоль оси x_1 , уменьшая объем замкнутой области.

Построение аналитического решения

Пусть при $t = 0$ в замкнутой области (в прямоугольном параллелепипеде) размером $[a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times [a_3, b_3]$ равномерно распределены частицы. Тогда плотность распределения частиц по пространственным координатам $f_x(0, \mathbf{x})$ в такой области [2, 3] определяется как

$$f_x(0, \mathbf{x}) = \rho_0 f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3) = \rho_0 \prod_{i=1}^3 \frac{1}{b_i - a_i} I_{(a_i, b_i)}(x_i). \quad (1)$$

Пусть координаты случайного вектора скорости $\mathbf{v}$, равномерно распределенного на поверхности единичной сферы, задаются системой уравнений [4–6]:

$$\begin{cases} v_1 = \sin \theta \cos \varphi \\ v_2 = \sin \theta \sin \varphi \\ v_3 = \cos \theta \end{cases}, \quad (2)$$

где $\theta = \arccos(2\xi - 1)$; $\varphi = 2\pi\eta$; ξ и η — случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[0, 1)$.

Известно, что площадь единичной сферы равна 4π , тогда плотность распределения частиц на поверхности этой сферы в сферической системе координат имеет вид:

$$f_4(0, \theta, \varphi) = \frac{\cos(\theta)}{2} I_{(0, \pi)}(\theta) \cdot \frac{1}{2\pi} I_{(0, 2\pi)}(\varphi), \quad (3)$$

где $\theta \in [0, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$.

Поскольку площадь единичной сферы S может быть выражена в явном виде через любую из переменных, площадь сферы можно вычислить по формуле (4). Отсюда видно, что, в отличие от пространства координат, компоненты которого не зависят друг от друга, пространство скоростей имеет зависимые компоненты. Из этого следует, что плотность распределения частиц по скоростям можно представить в виде произведения частной и условной плотностей распределения [7]:

$$\begin{aligned}
\int_S f_v(0, \mathbf{v}) dS &= 2 \int_{D(v_i, v_j)} \frac{1}{4\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial v_k}{\partial v_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_k}{\partial v_j}\right)^2} dv_i dv_j = 2 \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-v_i^2}}^{\sqrt{1-v_i^2}} \frac{1}{4\pi} \frac{dv_i dv_j}{\sqrt{1-v_i^2-v_j^2}} = \\
&= \int_{v_{i,1}}^{v_{i,2}} f_{4+i}(v_i) dv_i \int_{v_{j,1}=\phi_1(v_i)}^{v_{j,2}=\phi_2(v_i)} f_{7+j}(v_j|v_i) dv_j = \int_{-1}^1 \frac{1}{2} dv_i \cdot 2 \int_{-\sqrt{1-v_i^2}}^{\sqrt{1-v_i^2}} \frac{1}{2\pi} \frac{dv_j}{\sqrt{1-v_i^2-v_j^2}} = 1, \quad (4)
\end{aligned}$$

где $v_i^2 + v_j^2 + v_k^2 = 1^2$ — уравнение единичной сферы S с центром в начале координат; $D(v_i, v_j)$ — проекция полусферы на плоскость $Ov_i v_j$.

В результате произведение пространства координат на пространство скоростей даст плотность распределения частиц в фазовом пространстве в начальный момент времени:

$$f(0, \mathbf{x}, \mathbf{v}) = f_x(0, \mathbf{x}) f_v(0, \mathbf{v}). \quad (5)$$

Пусть на границах области расположены плоскости, одна из которых подвижна, а остальные — нет. Пусть левая граница движется внутрь, уменьшая первоначальную область, со скоростью $\mathbf{u} = (u_1, 0, 0)$, где $u_1 \in (0, 1]$. Объем куба V , изменяющегося с течением времени t , рассчитывается по следующей формуле:

$$V(t) = l_1(t) \prod_{i=2}^3 (b_i - a_i), \quad (6)$$

где $l_1(t) = b_1 - (a_1 + u_1 t)$.

Поскольку выполняется условие параллельности нормалей противоположных стенок осей, тогда при взаимодействии частицы со стенкой происходит изменение только в одной компоненте скорости, совпадающей с ненулевой компонентой нормали. В случае когда стенка неподвижна, в соответствующей компоненте скорости меняется знак на противоположный. Если рассмотреть проекции скоростей частиц v_2 и v_3 , то можно заметить, что эти величины по модулю постоянны у частиц, находящихся внутри замкнутой области. Из условия начального распределения частиц в фазовом пространстве, закона сохранения объема в фазовом пространстве (теорема Лиувилля) и зеркального отражения выдвигается предположение о том, что следующие частные плотности распределения с течением времени $t \geq 0$ меняться не будут, т.е.

$$f_6(t, v_2) = f_6(v_2) = \frac{1}{2} I_{(-1, 1)}(v_2), \quad (7)$$

$$f_2(t, x_2) = f_2(x_2) = \frac{1}{b_2 - a_2} I_{(a_2, b_2)}(x_2), \quad (8)$$

$$f_7(t, v_3) = f_7(v_3) = \frac{1}{2} I_{(-1, 1)}(v_3), \quad (9)$$

$$f_3(t, x_3) = f_3(x_3) = \frac{1}{b_3 - a_3} I_{(a_3, b_3)}(x_3). \quad (10)$$

Пусть аналогично одномерной модели адиабатического сжатия газа [1] частицы в начальный момент времени делятся условно на две группы в зависимости от дальнейшего первого взаимодействия с подвижной или неподвижной стенками, у которых нормали параллельны оси x_1 . На рис. 1 представлено такое разделение на две группы, которое зависит от начального местоположения координаты x_1 , компоненты скорости v_1 и компоненты скорости подвижной стенки u_1 . Зеленым цветом выделена область, в которой частная плотность распределения $f_{11}(0, x_1, v_1)$ частиц, относящихся к 1-ой группе, а красным — ко 2-ой. Следует отметить тот факт, что при $t = 0$ частная плотность $f_{11}(0, x_1, v_1)$

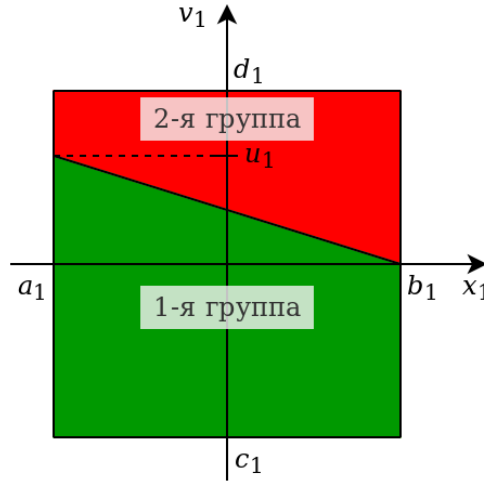


Рис. 1. Схема условного разделения частиц в кубе на две большие группы в зависимости от координаты x_1 , компоненты скорости v_1 частиц и компоненты скорости стенки u_1 в начальный момент времени

равна $1/(2 \cdot l_1(0))$, значение скорости v_1 для частиц 1-ой группы изменяется от 0 до 1, а для 2-ой группы — от -1 до u_0 .

Исходя из вышесказанного, получается, что плотность распределения $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$ можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) f_{12}(t, x_1, \mathbf{v}) = \\ &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_2} f_{12}(t, x_1, \mathbf{v}) dv_2 dv_3 \cdot f_{13}(t, v_2 | x_1, v_1) f_{14}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2) = \\ &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) f_{11}(t, x_1, v_1) f_{13}(t, v_2 | x_1, v_1) f_{14}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2). \end{aligned} \quad (11)$$

В свою очередь плотность распределения частиц $f_{11}(t, x_1, v_1)$ в произвольный момент времени t представляется в виде суммы плотностей распределения:

$$f_{11}(t, x_1, v_1) = \sum_{s=1}^n f_{11}^{\{s\}}(t, x_1, v_1), \quad (12)$$

где s — номер группы частиц, n — число групп.

И, наконец, величина $f_{11}^{\{s\}}(t, x_1, v_1)$ имеет вид:

$$f_{11}^{\{s\}}(t, x_1, v_1) = Q^{\{s\}}(t, x_1) I_{(c_1^{\{s\}}, d_1^{\{s\}})}(v_1), \quad (13)$$

где величины $Q^{\{s\}}(t, x_1)$, $c_1^{\{s\}}$ и $d_1^{\{s\}}$ рассчитываются аналогично формулам, представленным в [1].

Тогда из выше представленных утверждений можно вычислить макроскопические величины следующим способом. Например, расписав плотность распределения $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$ как в формуле (11), можно вычислить плотность газа $\rho(t, \mathbf{x})$:

$$\begin{aligned} \rho(t, \mathbf{x}) &= \int_{R_3} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} = \int_{R_3} [\rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) f_{11}(t, x_1, v_1) f_{13}(t, v_2 | x_1, v_1) f_{14}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2)] d\mathbf{v} = \\ &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} f_{11}(t, x_1, v_1) dv_1 \cdot \int_{R_1} f_{13}(t, v_2 | x_1, v_1) dv_2 \int_{R_1} f_{14}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2) dv_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Из формулы (14) два последних интеграла связаны с расчетом условных плотностей распределения и равняются 1. В результате получается, что

$$\begin{aligned}\rho(t, \mathbf{x}) &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} f_{11}(t, x_1, v_1) dv_1 = \\ &= \rho_0 \prod_{i=2}^3 \frac{1}{b_i - a_i} I_{(a_i, b_i)}(x_i) \int_{R_1} \sum_{s=1}^n [Q^{\{s\}}(t, x_1) I_{(c_1^{\{s\}}, d_1^{\{s\}})}(v_1)] dv_1. \quad (15)\end{aligned}$$

Рассуждая аналогичным образом, можно вычислить компоненту гидродинамической скорости $\bar{v}_1$:

$$\bar{v}_1(t, \mathbf{x}) = \int_{R_3} v_1 f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} / \rho(t, \mathbf{x}) = \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} v_1 f_{11}(t, x_1, v_1) dv_1 / \rho(t, \mathbf{x}). \quad (16)$$

Для того чтобы вычислить $\bar{v}_2(t, \mathbf{x})$, следует расписать следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{v}_2(t, \mathbf{x}) &= \int_{R_3} v_2 f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} / \rho(t, \mathbf{x}) = \\ &= \int_{R_3} [v_2 \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) f_6(t, v_2) f_{15}(t, x_1, v_1 | v_2) f_{16}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2)] d\mathbf{v} / \rho(t, \mathbf{x}) = \\ &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} v_2 f_6(t, v_2) dv_2 \int_{R_1} f_{15}(t, x_1, v_1 | v_2) dv_1 \cdot \int_{R_1} f_{16}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2) dv_3 / \rho(t, \mathbf{x}). \quad (17)\end{aligned}$$

Домножив и разделив на интеграл $\int_{R_1} f_6(t, v_2) dv_2$, равный 1, можно получить следующую формулу:

$$\begin{aligned}\bar{v}_2(t, \mathbf{x}) &= \rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} v_2 f_6(t, v_2) dv_2 \int_{R_1} f_{15}(t, x_1, v_1 | v_2) dv_1 \cdot \\ &\cdot \int_{R_1} f_{16}(t, v_3 | x_1, v_1, v_2) dv_3 \int_{R_1} f_6(t, v_2) dv_2 / \left[\int_{R_1} f_6(t, v_2) dv_2 \cdot \rho(t, \mathbf{x}) \right] = \\ &= \int_{R_1} v_2 f_6(t, v_2) dv_2 \cdot \rho(t, \mathbf{x}) / \rho(t, \mathbf{x}). \quad (18)\end{aligned}$$

Следует учитывать, что отношение $\rho(t, \mathbf{x}) / \rho(t, \mathbf{x})$ равняется 1, если плотность распределения частиц больше нуля ($f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) > 0$) при условии, что в момент времени t в окрестности точки $(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ существуют частицы, и 0 — в противном случае. Тогда, заменив $\rho(t, \mathbf{x}) / \rho(t, \mathbf{x})$ на $\text{sgn}(\rho(t, \mathbf{x}))$, получим окончательный вид:

$$\bar{v}_2(t, \mathbf{x}) = \int_{R_3} v_2 f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} / \rho(t, \mathbf{x}) = \text{sgn}(\rho(t, \mathbf{x})) \int_{R_1} v_2 f_6(t, v_2) dv_2. \quad (19)$$

Компонента гидродинамической скорости $\bar{v}_3(t, \mathbf{x})$ вычисляется точно так же, как и компонента гидродинамической скорости $\bar{v}_2(t, \mathbf{x})$, т.е.

$$\bar{v}_3(t, \mathbf{x}) = \int_{R_3} v_3 f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} / \rho(t, \mathbf{x}) = \text{sgn}(\rho(t, \mathbf{x})) \int_{R_1} v_3 f_7(t, v_3) dv_3. \quad (20)$$

Используя вышеописанные рассуждения, можно аналогичным образом вычислить внутреннюю энергию единицы массы газа $e(t, \mathbf{x})$:

$$\begin{aligned}
e(t, \mathbf{x}) &= \frac{1}{2\rho(t, \mathbf{x})} \sum_{i=1}^3 \int_{R_3} (v_i - \bar{v}_i(t, \mathbf{x}))^2 f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v} = \\
&= \frac{1}{2} \left[\rho_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \int_{R_1} (v_1 - \bar{v}_1(t, \mathbf{x}))^2 f_{11}(t, x_1, v_1) dv_1 / \rho(t, \mathbf{x}) + \right. \\
&\quad + \operatorname{sgn}(\rho(t, \mathbf{x})) \int_{R_1} (v_2 - \bar{v}_2(t, \mathbf{x}))^2 f_6(t, v_2) dv_2 + \\
&\quad \left. + \operatorname{sgn}(\rho(t, \mathbf{x})) \int_{R_1} (v_3 - \bar{v}_3(t, \mathbf{x}))^2 f_7(t, v_3) dv_3 \right] \quad (21)
\end{aligned}$$

Зная внутреннюю энергию единицы массы газа $e(t, \mathbf{x})$, можно по уже по известным формулам рассчитать температуру $T(t, \mathbf{x})$ (см. формулу (22)) и давление $p(t, \mathbf{x})$ (см. формулу (23)).

$$T(t, \mathbf{x}) = \frac{2}{3R} e(t, \mathbf{x}), \quad (22)$$

$$p(t, \mathbf{x}) = \frac{2}{3} \rho(t, \mathbf{x}) e(t, \mathbf{x}). \quad (23)$$

Моделирование и анализ результатов

Были проведены серии вычислительных экспериментов при $\rho_0 = 1$, $[a_i, b_i] = [-0.5, 0.5]$ ($i = \overline{1, 3}$), различном числе частиц N и скоростях границы $\mathbf{u} = (u_1, 0, 0)$.

На рис. 2 представлена частная плотность распределения $f_{11}(t, x_1, v_1)$ (см. формулу (12)), значение которой изменяется с течением времени t . Из графиков видно, что с уменьшением скорости движения стенки u_1 число групп растет быстрее при одинаковой степени сжатия газа. Для наглядности области, относящиеся к различным группам, выделены разными цветами. Также следует отметить, что относительно оси v_1 нечетные группы расположены справа, а четные группы — слева.

Для качественного сравнения частной плотности распределения $f_5(t, v_1)$ вдоль компоненты v_1 , рассчитанной аналитическим способом, с результатами численного решения была дополнительная построена гистограмма распределения. На рис. 3 представлены графики изменения частной плотности распределения $f_5(t, v_1)$ и гистограммы при $N = 10^4$ в различные моменты времени t . Гистограмма распределения получена из статистического ряда с шагом 0.2. Число разрядов (делений), которое зависит от шага, рационально выбирать так, чтобы в результате их совокупность была в районе 10–20 [8]. Левая вероятностная шкала относится к графикам изменения условной плотности распределения, а правая частотная шкала — к гистограмме плотности распределения. Из графиков видно, что при выравнивании масштабов шкал гистограмма распределения вдоль оси v_1 сохраняет существенные особенности, сравнимые с частной плотностью распределения $f_5(t, v_1)$, вычисленной аналитически.

На рис. 4 представлены графики изменений статистических оценок макроскопических величин при $u_1 = \{1.0, 0.1\}$. Из графиков видно, что с увеличением числа частиц N в эксперименте численное решение приближается к аналитическому.

В табл. 1, 2 представлены оценки максимальных абсолютных и относительных погрешностей на отрезке $t \in [0, 0.5]$ при $u_1 = 1.0$ и на отрезке $t \in [0, 5]$ при $u_1 = 0.1$, рассчитанные по формулам:

$$\Delta_F = \max_t |F_{num} - F_{an}| \quad \delta_F = \frac{\Delta_F}{|F_{an}|} \cdot 100\%, \quad (24)$$

где F_{num} — численное значение; F_{an} — аналитическое значение; $t \in [0, t^*]$ — временной отрезок.

Максимальные относительные погрешности температуры δ_T и давления δ_p совпадают, поскольку погрешность плотности зависит только от вычислительной погрешности. С уменьшением скорости

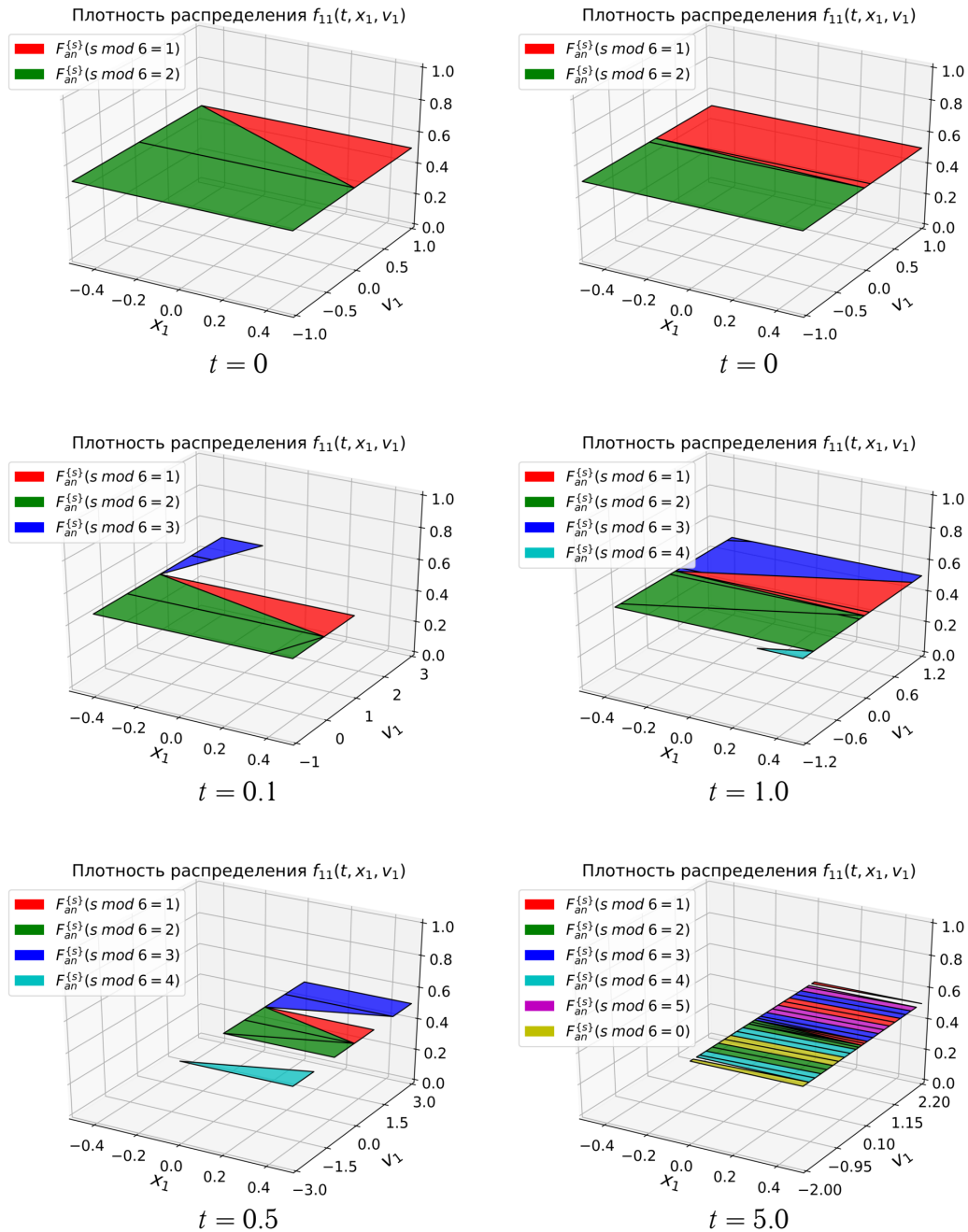


Рис. 2. Графики изменения частной плотности распределения $f_{11}(t, x_1, v_1)$ в различные моменты времени t : слева — $u_1 = 1.0$; справа — $u_1 = 0.1$

Таблица 1

Оценка максимальной абсолютной погрешности при различном числе частиц N и скоростях границы u_1

u_0	N	Δ_{v_1}	Δ_T	Δ_p
1.0	10^4	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$1.26 \cdot 10^{-3}$	$1.70 \cdot 10^{-2}$
	10^6	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$2.96 \cdot 10^{-4}$	$4.55 \cdot 10^{-3}$
	10^8	$2.05 \cdot 10^{-4}$	$1.15 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-4}$
0.1	10^4	$1.85 \cdot 10^{-2}$	$4.05 \cdot 10^{-4}$	$6.70 \cdot 10^{-3}$
	10^6	$2.07 \cdot 10^{-3}$	$2.26 \cdot 10^{-5}$	$3.65 \cdot 10^{-4}$
	10^8	$2.79 \cdot 10^{-4}$	$3.86 \cdot 10^{-6}$	$6.29 \cdot 10^{-5}$

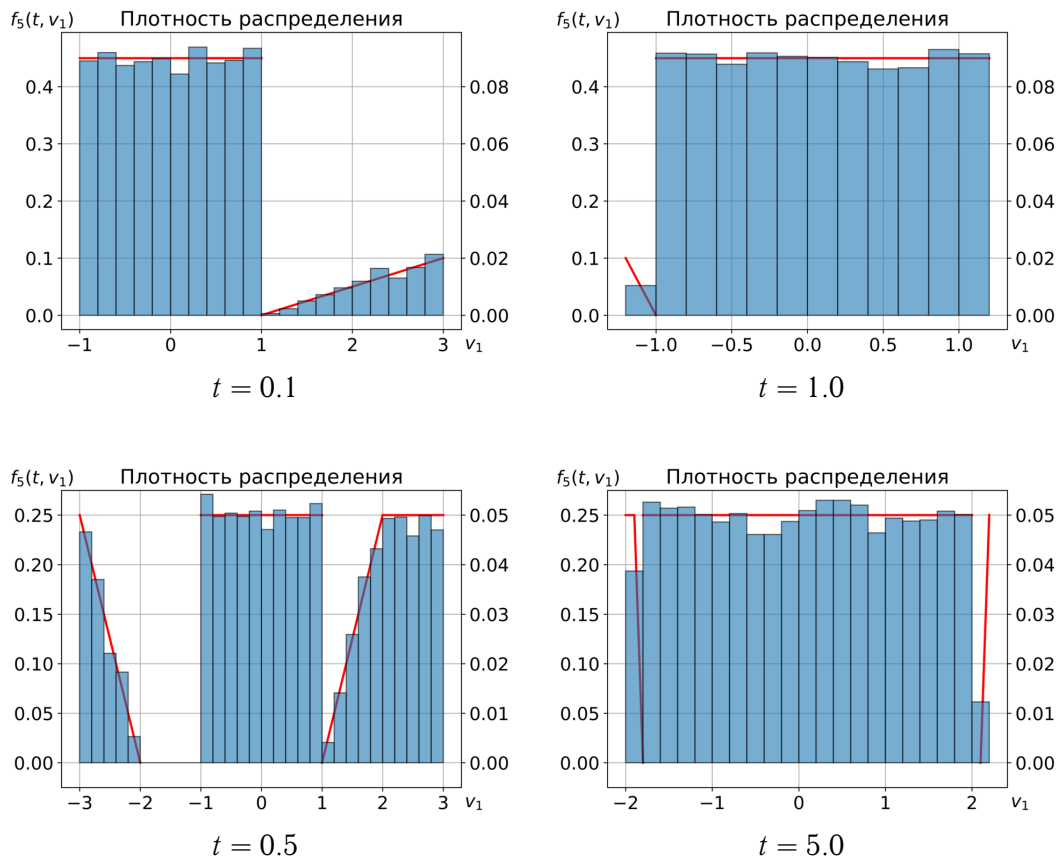


Рис. 3. Графики изменения частной плотности распределения $f_5(t, v_1)$ и гистограммы вдоль компоненты скорости v_1 в различные моменты времени t : слева — $u_1 = 1.0$; справа — $u_1 = 0.1$

Таблица 2

Оценка максимальной относительной погрешности при различном числе частиц N и скоростях границы u_1

u_0	N	δ_{v_1}	δ_T	δ_p
1.0	10^4	$7.66 \cdot 10^1$	2.13	2.13
	10^6	$3.09 \cdot 10^1$	$2.54 \cdot 10^{-1}$	$2.54 \cdot 10^{-1}$
	10^8	1.34	$9.46 \cdot 10^{-3}$	$9.46 \cdot 10^{-3}$
0.1	10^4	$1.18 \cdot 10^2$	$5.07 \cdot 10^{-1}$	$5.07 \cdot 10^{-1}$
	10^6	$2.67 \cdot 10^1$	$2.93 \cdot 10^{-2}$	$2.93 \cdot 10^{-2}$
	10^8	$7.90 \cdot 10^{-1}$	$4.92 \cdot 10^{-3}$	$4.92 \cdot 10^{-3}$

стенки u_1 уменьшаются максимальные абсолютные и относительные погрешности температуры и давления. Порядок погрешности статистических оценок макроскопических величин убывает согласно выражению:

$$\frac{\sqrt{\langle (\Delta_F)^2 \rangle}}{\langle F \rangle} \sim \frac{1}{\sqrt{L}}, \quad (25)$$

где $(\Delta_F)^2 = \langle F^2 \rangle - \langle F \rangle^2$ — средняя квадратичная флуктуация; F — статистическая оценка макроскопической величины; L — число частиц в выделенной подобласти (элементе объема dx), в которой вычисляются статистические оценки макроскопических величин.

Оценка производительности программ, связанных с расчетом основного блока с учетом сохранения данных, выполнена на процессоре Intel Xeon E5-2690 V2 (240 GFlops DP для 10 ядер) при следующих параметрах: шаг по времени $\Delta t = 0.001$, число итераций 5000, число частиц $N = 2^{17}$. Результаты работы различных версий программ представлены в табл. 3. В не векторизованной версии про-

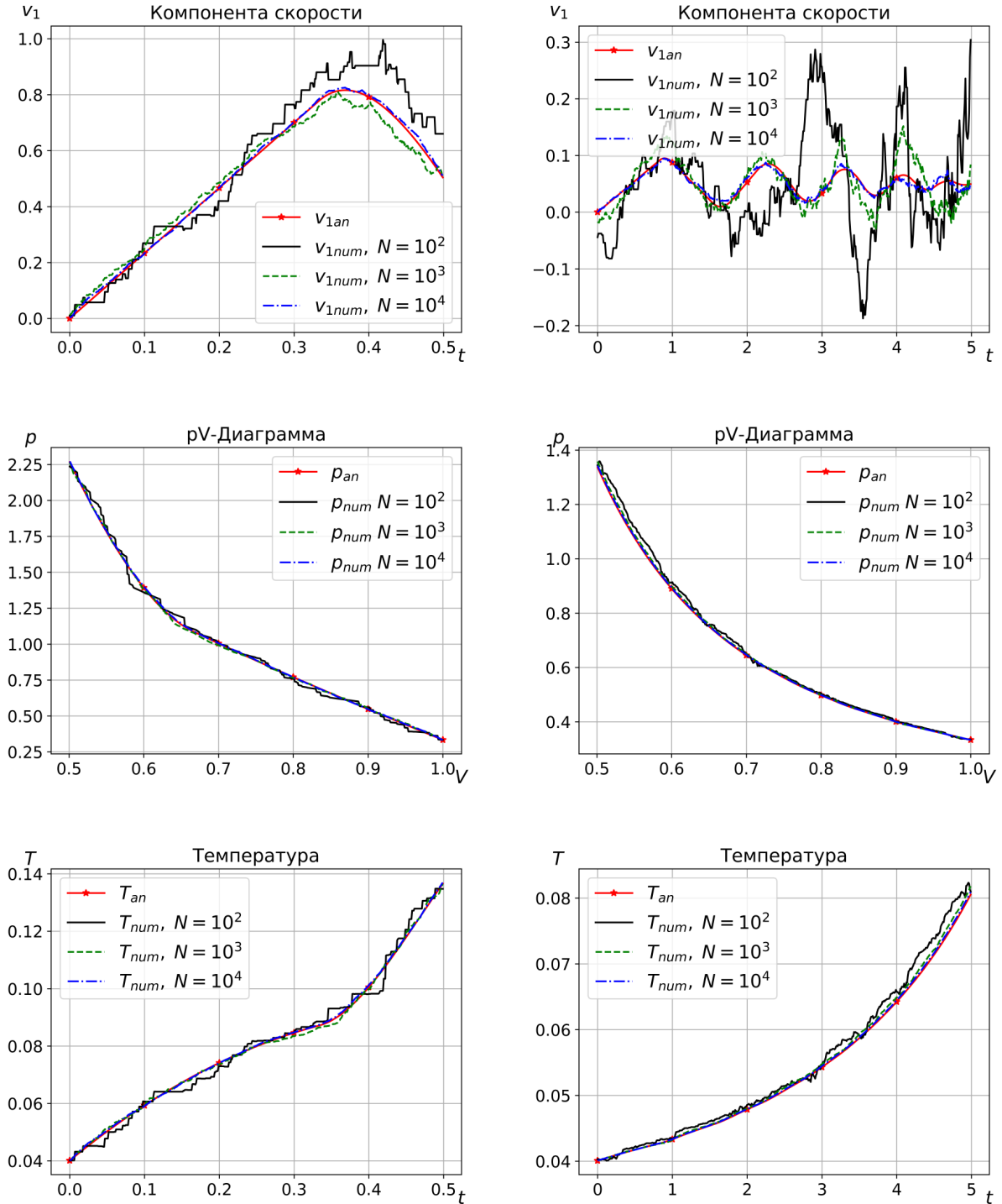


Рис. 4. Графики изменения аналитического решения F_{an} и статистических оценок макроскопических параметров F_{num} при различном числе частиц в эксперименте N в зависимости от времени t : слева — $u_1 = 1.0$; справа — $u_1 = 0.1$

граммы выполнены декомпозиция и выравнивание данных. Автовекторизованная версия программы, в отличие от неавтовекторизованной, скомпилирована с использованием дополнительных ключей, позволяющих выполнить автовекторизацию и дополнительную оптимизацию программного кода с помощью компилятора. В векторизованной версии программы дополнительно расставлены директивы препроцессора, выполнены перестановки некоторых операций внутри циклов и применены другие оптимизации. Наилучший результат показала векторизованная версия (39 % от пиковой производительности).

На рис. 5 дополнительно рассмотрен случай изменения аналитического решения p_{an} в зависи-

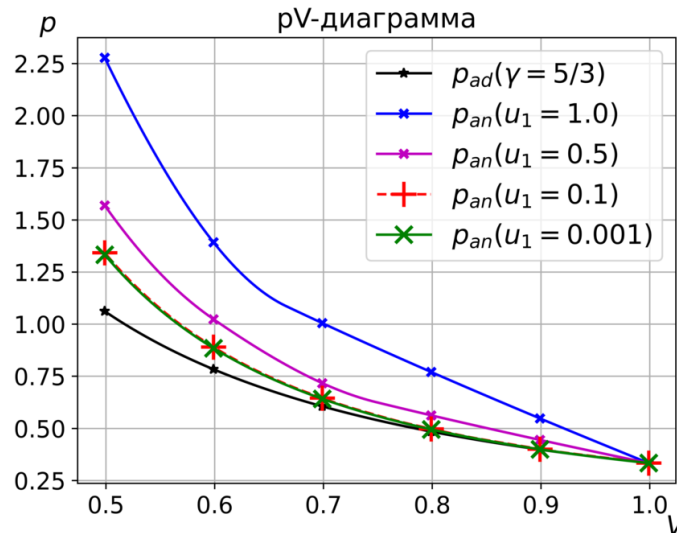


Рис. 5. Графики изменения адиабаты p_{ad} и аналитического решения p_{an} при различных скоростях движения стенки u_1 на pV плоскости

Таблица 3

Оценка производительности различных версий программы на процессоре Intel Xeon E5-2690 V2

Версия программы	t , с	R_{task} , GFlops	R_{task}/R_{peak} , %
Невекторизованная	198.51	0.8	3.3
Автовекторизованная	19.691	6.99	29.11
Векторизованная	15.48	9.42	39.25

мости от скорости движения стенки u_1 и выполнено сравнение с графиком адиабаты p_{ad} идеального одноатомного газа с показателем адиабаты γ , равным $5/3$. В процессе адиабатического сжатия газа наполовину от первоначального объема наблюдается качественное изменение давления p_{ad} при уменьшении скорости стенки с 1.0 до 0.1, а при дальнейшем уменьшении скорости стенки на два порядка (до 0.001) качественное различие незначительно. Тем не менее сохраняется существенное различие аналитического решения p_{an} с графиком адиабаты p_{ad} вне зависимости от скорости стенки.

Заключение

Рассмотрена задача об адиабатическом сжатии газа Кнудсена в трехмерном пространстве с подвижной границей, для которой был найден класс точных решений. Идея нахождения класса точных решений, как и в одномерном случае [1], заключалась в определении плотности распределения молекул в пространстве координат и скоростей с течением времени. С помощью условной плотности распределения и предположений, основанных на начальном распределении частиц в фазовом пространстве, законах сохранения и зеркального отражения, удалось свести решение трехмерной задачи к одномерной. Принципиальное отличие при вычислении макроскопических величин между одномерной и трехмерной задачами заключалось в том, что в первом случае требовалось суммировать плотность распределения по скоростям, поскольку пространство скоростей дискретное, а в последнем случае — интегрировать плотность распределения по кусочно-непрерывному пространству скоростей. Дополнительно были проведены серии вычислительных экспериментов с использованием разработанного комплекса программ при различных параметрах моделей. Результаты верификации разработанного комплекса программ демонстрируют качественное и количественное соответствие статистических оценок макроскопических величин полученным аналитическим решениям. В задачах расчета траекторий движения частиц в замкнутой области с подвижными границами с применением декомпозиции и векторизации данных была достигнута производительность, равная 39 % от пиковой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быковских Д. А., Галкин В. А. Об адиабатическом сжатии идеального бесстолкновительного газа в одномерном пространстве. *Успехи кибернетики*. 2020;1(4):6–12.
2. Соболев И. М. *Численные методы Монте-Карло*. М.: Наука; 1973. 312 с.
3. Banks J. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. New York: Wiley; 1998. 849 p.
4. Sibuya M. A. Method for Generating Uniformly Distributed Points on N-Dimensional Spheres. *Ann Inst Stat Math*. 1962;14:1:81–85.
5. Marsaglia G. Choosing a Point from the Surface of a Sphere. *Ann Math Stat*. 1972;43:2:645–646.
6. Копытов Н. П. *Равномерное распределение точек на поверхностях и его применение в исследованиях структурно-неоднородных сред* : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2015. 121 с.
7. Крамер Г. *Математические методы статистики*. М.: Мир; 1975. 648 с.
8. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей*. М.: Высш. шк.; 1999. 576 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-08

МЕТАПЕРЕХОДЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Г. Е. Деев^а, С. В. Ермаков^б

Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация,
^а georgdeo@mail.ru, ^б  ermakov@iate.obninsk.ru

Аннотация: метод порождения бесконечной последовательности устройств: $\text{КУ} \xrightarrow{\text{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\text{свертка}} \text{КУ} \xrightarrow{\text{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\text{свертка}} \dots$, где КУ — конечное устройство, БКУ — бесконечное устройство, приведенный в статье [1] в обобщенном виде, в рассматриваемой статье проиллюстрирован на конкретном примере, когда в качестве первичного конечного устройства взято достаточно простое устройство, $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, основной вычисляемой функцией которого является тождественное отображение. Выясняется, что среди конечных устройств генерируемой последовательности, а также ее боковых ответвлений содержатся многие используемые в математике функции и, более того, при движении вдоль последовательности вправо к бесконечности много такого, что мы еще не используем в нашей математике актуально, хотя и имеем об этом общие представления. Важно, что конечные элементы этой последовательности задаются в виде вычислительных устройств, используемых в теоретической работе над ними, а также приспособленных к реализации их в «железе» и дальнейшему созданию на их основе В-компьютеров [6]. Основными метаоперациями, выполняемыми над элементами этой последовательности, являются *экстравертность* и *свертка*.

Ключевые слова: числоид, экстравертность по состояниям, ядро автомата, основная вычисляемая функция, сопутствующие функции.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-07-00862.

Для цитирования: Деев Г. Е., Ермаков С. В. Метопереходы вычислительных устройств. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):65–74. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-08.

META TRANSITIONS IN COMPUTERS

G. E. Deev^a, S. V. Ermakov^b

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation
^a georgdeo@mail.ru, ^b  ermakov@iate.obninsk.ru

Abstract: paper [1] proposes a general method for generating an infinite sequence of automata: $\text{FA} \xrightarrow{\text{deconvolution}} \text{IFA} \xrightarrow{\text{convolution}} \text{FA} \xrightarrow{\text{deconvolution}} \text{IFA} \xrightarrow{\text{convolution}} \dots$, where FA is a finite automaton, and IFA is an infinite automaton. This study presents an example where a simple $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ device is the primary finite automaton. Its main computable function is an identity map. It was found that the generated main sequence of finite automata and its side branches contain many known functions. Moreover, as we move along the sequence to the right to infinity, there are many entities still not used in mathematics, although we have some general notions. Note that the finite elements in this sequence are specified as computational devices suitable for theoretical research, hardware implementation, and the creation of B-computers [6]. The key meta-operations applied to the elements of the sequence are *deconvolution* and *convolution*.

Keywords: numberid, deconvolution of states, automaton kernel, main computable function, associated functions.

Acknowledgements: this study was supported by the RFBR grant 20-07-00862.

Cite this article: Deev G. E., Ermakov S. V. Meta Transitions in Computers. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):65–74. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-08.

Введение

В конце статьи [1] показана схема вычислительного симбиоза конечных и бесконечных устройств, представленная последовательностью:

$$\text{КУ} \xrightarrow{\text{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\text{свертка}} \text{КУ} \xrightarrow{\text{экстравертность}} \text{БКУ} \xrightarrow{\text{свертка}} \dots, \quad (1)$$

где КУ — конечное устройство, БКУ — бесконечное устройство. Все КУ и БКУ различны. При перемещении по стрелкам получаются все более совершенные устройства, как конечные, так и бесконечные. В каком смысле более совершенные вычислительные устройства? По понятным причинам нас интересуют, прежде всего, конечные устройства. Усовершенствование происходит по двум показателям. Во-первых, конечное устройство, происходящее из бесконечного, оказывается способным вести все вычисления, которые проводило исходное бесконечное устройство, но, более того, оно оказывается способным вести вычисления, которые не были включены в программу вычислительных возможностей бесконечного устройства. Другими словами, синтезированное *конечное* устройство оказывается «более мощным», чем породившее его *бесконечное* устройство. Эффект, заслуживающий внимания. Во-вторых, порожденное конечное устройство имеет большее количество независимых переменных, что также указывает на увеличение возможностей этого устройства, по сравнению с родительским устройством.

Переход от КУ₁ к КУ₂ по схеме КУ₁ $\xrightarrow{\text{экстравертность}}$ БКУ₁ $\xrightarrow{\text{свертка}}$ КУ₂ есть метасистемный переход от устройств типа КУ₁ и БКУ₁, расположенных в «нижнем» мире устройств, причем БКУ₁ является предельным воплощением устройств типа КУ₁ в нижнем мире устройств, а КУ₂ является устройством из «более высокого» мира устройств, которое, будучи конечным в этом мире устройств, может выполнить все вычисления устройств типа КУ₁ и БКУ₁ из «нижнего» мира. При этом важно, что устройство КУ₂, будучи конечным, может быть реализовано «в железе».

По этой схеме связь вычислительных миров происходит через бесконечность. Инструментом, посредством которого происходит связь миров, является свертка [2, 3]. Свертка применима всегда.

Устройство $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$

Далее мы рассмотрим переходы типа КУ₁ $\xrightarrow{\text{экстравертность}}$ БКУ₁ $\xrightarrow{\text{свертка}}$ КУ₂, взяв за основу в роли КУ₁ устройство $\sum_{i=1}^{\infty} \bar{x}_i|\bar{q}_{(4)} = \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, $\bar{x}_1 = \bar{x} = \dots x_r \dots x_1 x_0$, $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$, $\bar{q} \in Q_1 = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$, функционирующее в четверичной системе счисления и заданное таблицей 1.

Таблица 1

Автомат $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, $Q_1 = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$

q \ x	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$
0	$\overleftarrow{3},3$	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$
1	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$
2	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$
3	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$

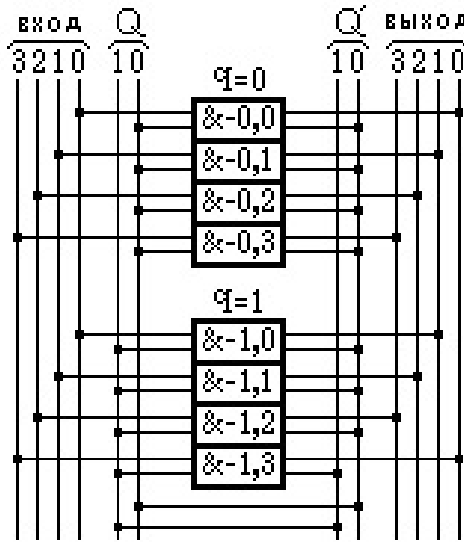
Его формульное задание таково:

$$\begin{cases} \theta \bar{q}x = \rangle x + \bar{q} \langle, \\ \sigma \bar{q}x = \langle x + \bar{q} \rangle, \end{cases} \quad (2)$$

где $x \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$, $\bar{q} \in Q_1 = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$, θ — функция переходов, σ — функция выходов, $\langle \overleftarrow{0}x_n \dots x_1 x_0 \rangle = x_0$, $\rangle \overleftarrow{0}x_n \dots x_1 x_0 \langle = \overleftarrow{0}x_n \dots x_1$ — функции отрыва, $\bar{x} = \overleftarrow{0}x_n \dots x_1 x_0$ — число, подаваемое на вход, $x_i \in Z_{(4)} = \{0,1,2,3\}$ — цифры, $\overleftarrow{0} = \dots 00 \dots 000$ — бесконечное число нулей, начиная с некоторого разряда; аналогично, $\overleftarrow{3} = \dots 33 \dots 333$.

Помимо табличного и формульного задания (2) устройство имеет задание с помощью В-схемы.

Это устройство известно также под названием автомат сдвига [4, 5]. Мы дали ему другое обозначение, по сравнению с ранее использованным $S \bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, поскольку оно единообразно включается в семейство устройств (1) с похожими обозначениями.

Рис. 1. В-схема устройства $\bar{x}|q(4)$

Ядро автомата содержит три состояния: $Q_{nuc}^{(00)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$. Напомним определение ядра Q_{nuc} автомата:

$$[q \in Q_{nuc}] \stackrel{def}{\longleftrightarrow} \left[\forall x \left[\theta q x \in Q_{nuc} \right] \& \exists x \exists q' \left[q = \theta q' x \right] \right].$$

Таким образом, из состояний ядра возможны переходы только в состояния ядра и в состояния ядра возможны переходы из состояний ядра.

Состояния, задающие границы ядра, находятся из уравнений $\rangle q \langle = q$, $\rangle 3 + q \langle = q$. Их корнями являются $\bar{q} = \overleftarrow{3}$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$, т. е. элементы множества $Q_{nuc}^{(00)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$.

В таблице выделена ее глубинная ядерная часть. Как видно, основной вычисляемой функцией является тождественное отображение: $f_0(\bar{x}) \equiv \bar{x} \equiv 1 \cdot \bar{x}$. Ее вычисление происходит при постановке автомата в качестве начального в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}$. С точки зрения схемной интерпретации, устройство, поставленное в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, осуществляет задержку на один такт, длительность которого равна задержке в элементе $\&$. Помимо основной имеются две сопутствующие функции. Они вычисляются из состояний, отличных от $\bar{q} = \overleftarrow{0}$. Сопутствующая функция $f_1(\bar{x}) \equiv \bar{x}|\overleftarrow{0}1$ вычисляется при постановке автомата в качестве начального в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$. С помощью сопутствующей функции $f_1(\bar{x})$ определяется отношение непосредственного следования. Мы говорим, что $\bar{x}'$ непосредственно следует за $\bar{x}$, если $\bar{x}' = \bar{x}|\overleftarrow{0}1$. Это определение может быть аксиоматизировано (будет иметь место полное совпадение с обычной аксиоматикой), но нужно отметить, что аксиоматическое задание отношения непосредственного следования является вторичным по сравнению с вычислительным согласно *принципу*: вначале дается объект, а потом изучаются его свойства. Первичным является устройство $\bar{x}' = \bar{x}|\overleftarrow{0}1$, а затем мы изучаем его свойства. Канонизируя эти свойства, получаем аксиоматику понятия непосредственного следования. А posteriori можно обратить ситуацию и из аксиоматики получить представление об устройстве.

Приведем пример нахождения непосредственно следующего элемента с использованием функции $f_1(\bar{x})$.

Пример 1. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}322$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$. За вычислением следим с помощью развертки:

0	$t \geq 3$	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	3	2	2	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	3	2	3	y

Читаем результат: $\overleftarrow{0}322|\overleftarrow{0}1 = \overleftarrow{0}323$. Устройство информирует нас о том, что числом, непосредственно следующим за $\bar{x} = \overleftarrow{0}322$, является $\bar{x}' = \overleftarrow{0}323$.

Другая сопутствующая функция $f_{-1}(\bar{x}) \equiv \bar{x}|\overleftarrow{3}$ вычисляется при постановке автомата в состояние $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ в качестве начального. С помощью сопутствующей функции $f_{-1}(\bar{x})$ определяется отношение непосредственного предшествования. Мы говорим, что ' $\bar{x}$ непосредственно предшествует $\bar{x}$ ', если ' $\bar{x} = \bar{x}|\overleftarrow{3}$ '. Это определение также может быть аксиоматизировано с комментарием, аналогичным комментарию для $f_1(\bar{x})$.

Приведем пример нахождения непосредственно предшествующего элемента с использованием функции $f_{-1}(\bar{x})$.

Пример 2. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}322$, $\bar{q} = \overleftarrow{3}$. За вычислением следим с помощью развертки:

0	$t \geq 3$	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	3	2	2	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{3}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	3	2	1	y

Читаем результат: $\overleftarrow{0}322|\overleftarrow{3} = \overleftarrow{0}321$. Устройство информирует нас о том, что числом, непосредственно предшествующим числу $\bar{x} = \overleftarrow{0}322$, является ' $\bar{x} = \overleftarrow{0}321$ '.

Интересным также является вопрос о том, что предшествует нулю, т.е. элементу $\overleftarrow{0}$. *Пример 3.* Для нахождения предшествующего элемента, согласно определению ' $\bar{x} = \bar{x}|\overleftarrow{3}$ ', вместо $\bar{x}$ надо взять $\overleftarrow{0}$. Имеем развертку

0	$t \geq 3$	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	x
$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{3}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{3}$	3	3	3	y

Читаем результат: $\overleftarrow{3} = \overleftarrow{0}|\overleftarrow{3}$, т.е. объект, предшествующий нулю, изображается автоматом как $\overleftarrow{3}$. Но, по нашим представлениям, таковым объектом является минус единица, (-1) . Следовательно, $\overleftarrow{3}$ играет роль (-1) , что и использовано в таблице 1.

Строго говоря, определению понятия ядра автомата удовлетворяют четыре множества: $Q_{\text{нис}}^{(-1)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}\}$, $Q_{\text{нис}}^{(0)} = \{\overleftarrow{0}\}$, $Q_{\text{нис}}^{(1)} = \{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$ и $Q_{\text{нис}}^{(00)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$. Ядро $Q_{\text{нис}}^{(0)}$ — глубинное, $Q_{\text{нис}}^{(00)}$ — полное. На глубинном ядре устройство вычисляет основную функцию — тождественное отображение. На полном ядре из состояния $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$ устройство реализует внутреннее экстравертирование по отношению к основной функции и вычисляет новую функцию — функцию сдвига на множестве натуральных чисел (в число которых включается ноль, $\overleftarrow{0}$), вычисляя для каждого числа непосредственно следующее за ним: $\bar{x}' = \bar{x}|\overleftarrow{0}1$. Устройство в этом состоянии выполняет, по терминологии аксиоматики Пеано, роль *последователя*, являясь материализацией этого абстрактного понятия. На полном ядре из состояния $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ устройство реализует другое внутреннее экстравертирование по отношению к основной функции и вычисляет новую функцию — функцию отрицательного сдвига на множестве натуральных чисел, вычисляя для каждого числа непосредственно предшествующее ему число: ' $\bar{x} = \bar{x}|\overleftarrow{3}$ '.

Совокупная вычислительная работа устройства из состояний $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$ приводит к порождению множества всех целых чисел $Z = \{\dots, \overleftarrow{3}1, \overleftarrow{3}2, \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2, \dots\}$, где использованы числовые представления: $-1 = \overleftarrow{3} = \dots 333$, $-2 = \overleftarrow{3}2 = \dots 332$ и т. д.

Экстравертирование по состояниям автомата $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ порождает бесконечный автомат $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$, $\bar{q} \in Q_{\infty} = Z = \{\dots, \overleftarrow{3}1, \overleftarrow{3}2, \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2, \overleftarrow{0}3, \dots\}$ с теми же уравнениями функционирования (2) и с тем же ядром $Q_{\text{нис}}^{(00)} = Q_{\text{нис}}^{(-1)} \cup Q_{\text{нис}}^{(0)} \cup Q_{\text{нис}}^{(1)}$.

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 | \bar{q}_{(4)}$

Выполнив экстравертирование и свертку автомата $\sum_{i=1}^{i=1} \bar{x}_i | \bar{q}_{(4)} = \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$ [3], приходим к устройству

$\sum_{i=1}^{i=2} \bar{x}_i | \bar{q}_{(4)} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 | \bar{q}_{(4)}$ (используем далее второе из двух обозначений), табличное задание которого приведено далее.

Состояния, задающие границы ядра, ядра находятся из уравнений $\langle q \rangle = q$ и $\langle 12 + q \rangle = q$. Первому уравнению удовлетворяют $q = \overleftarrow{3}$ и $q = \overleftarrow{0}$, нижняя граница ядра. Второму уравнению удовлетворяют $q = \overleftarrow{0}1$ и $q = \overleftarrow{0}2$, верхняя граница ядра. Они продолжают друг друга и в совокупности дают полное ядро $Q_{nuc}^{(00)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\}$.

Устройство имеет четыре ядра: $Q_{nuc}^{(-1)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$, $Q_{nuc}^{(0)} = \{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1\}$ – глубинное, $Q_{nuc}^{(1)} = \{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\}$ и $Q_{nuc}^{(00)} = \{\overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\}$ – полное. $Q_{nuc}^{(00)} = Q_{nuc}^{(-1)} \cup Q_{nuc}^{(0)} \cup Q_{nuc}^{(1)}$. Из начального состояния $\bar{q} = \overleftarrow{0}$ устройство вычисляет основную функцию $f_0(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$, из состояния $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$ устройство вычисляет функцию $f_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + 1$, из состояния $\bar{q} = \overleftarrow{0}2$ устройство вычисляет функцию $f_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + 2$, из состояния $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ устройство вычисляет функцию $f_{-1}(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \overleftarrow{3} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 - 1$.

Функции $f_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2), f_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2), f_{-1}(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ – сопутствующие.

Операция сложения $f_0(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$ определяется функцией f_0 как первичная, а все ее свойства (аксиоматика и следствия), вытекающие из таблицы 2, вторичны.

Таблица 2

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 | \bar{q}_{(4)}$

	q	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$
x_1	x_2				
0	0	$\overleftarrow{3}, 3$	$\overleftarrow{0}, 0$	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$
1	0	$\overleftarrow{0}, 0$	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$
2	0	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$
3	0	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$
0	1	$\overleftarrow{0}, 0$	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$
1	1	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$
2	1	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$
3	1	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$
0	2	$\overleftarrow{0}, 1$	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$
1	2	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$
2	2	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$
3	2	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$	$\overleftarrow{0}1, 3$
0	3	$\overleftarrow{0}, 2$	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$
1	3	$\overleftarrow{0}, 3$	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$
2	3	$\overleftarrow{0}1, 0$	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$	$\overleftarrow{0}1, 3$
3	3	$\overleftarrow{0}1, 1$	$\overleftarrow{0}1, 2$	$\overleftarrow{0}1, 3$	$\overleftarrow{0}2, 0$

Покажем, что это устройство (оно играет роль КУ₂) вычисляет все функции предыдущего вычислительного уровня.

Если взять $\bar{x}_2 = \overleftarrow{0}$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, то устройство будет вычислять тождественное отображение.

Если взять $\bar{x}_2 = \overleftarrow{0}$, $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$, то устройство будет вычислять сдвиг вправо.

Если взять $\bar{x}_2 = \overleftarrow{0}$, $\bar{q} = \overleftarrow{3}$, то устройство будет вычислять сдвиг влево.

Если взять $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, то устройство будет вычислять функцию $f_0(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$, т.е. сдвиг величины $\bar{x}_1$ на величину $\bar{x}_2$.

Тем самым, в соответствии с ранее сказанным, устройство действительно вычисляет все функции, которые доступны устройству $\bar{x}|\bar{q}_{(4)}$ из предыдущего «вычислительного мира», в том числе и в бесконечном его варианте. Обращаем при этом внимание на тот факт, что устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2|\bar{q}_{(4)}$ конечное, т.е. конечное устройство вычисляет все то, что вычисляет бесконечное на предыдущем вычислительном уровне [3–5]. Покажем на примере, как оно вычисляет основную функцию.

Пример 4. Пусть даны два натуральных числа $\bar{x}_1 = \overleftarrow{0}213303$ и $\bar{x}_2 = \overleftarrow{0}332013$. На вход устройства $\bar{x}_1 + \bar{x}_2|\bar{q}_{(4)}$ числа $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ поступают одновременно поразрядно парами цифр, $\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overleftarrow{0} \\ \overleftarrow{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}$. За вычислением следим с помощью развертки:

0	$t \geq 7$	6	5	4	3	2	1	0	t
	$\begin{pmatrix} \overleftarrow{0} \\ \overleftarrow{0} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \overleftarrow{0} \\ \overleftarrow{0} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}$	$\bar{q}$
	$\overleftarrow{0}$	1	2	1	1	3	2	2	y

В последней строке читаем легко проверяемый результат: $\overleftarrow{0}213303 + \overleftarrow{0}332013|\overleftarrow{0} = \overleftarrow{0}1211322$.

Выпишем уравнения функционирования этого устройства. Имеем

$$\begin{cases} \theta\bar{q}(x_1, x_2) = \langle x_1 + x_2 + \bar{q} \rangle, \\ \sigma\bar{q}(x_1, x_2) = \langle x_1 + x_2 + \bar{q} \rangle, \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{q} \in Q_{nuc}^{(00)} = \{ \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2 \}, x_i \in Z_{(4)} = \{0, 1, 2, 3\}.$$

Очевидно, что уравнения имеют смысл не только для $\bar{q} \in Q_{nuc}^{(00)} = \{ \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2 \}$, но и для любых $\bar{q}$ из множества целых чисел $\bar{q} \in Q_\infty = Z = \{ \dots, \overleftarrow{3}1, \overleftarrow{3}2, \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2, \overleftarrow{0}3, \dots \}$. Поэтому экстравертирование по состояниям *возможно* и мы естественным образом переходим к автомату (3) с бесконечным числом состояний. Применяя к нему свертку [2],[3], получаем конечный автомат следующего вычислительного уровня, выполняющий все функции автомата (3), а также кое-что дополнительно.

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3|\bar{q}_{(4)}$

Уравнения функционирования этого устройства подобны уравнениям (3) и имеют вид:

$$\begin{cases} \theta\bar{q}(x_1, x_2, x_3) = \langle x_1 + x_2 + x_3 + \bar{q} \rangle, \\ \sigma\bar{q}(x_1, x_2, x_3) = \langle x_1 + x_2 + x_3 + \bar{q} \rangle, \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{q} \in Q_{nuc}^{(00)} = \{ \overleftarrow{3}, \overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2, \overleftarrow{0}3 \}, x_i \in Z_{(4)} = \{0, 1, 2, 3\}.$$

Границы полного ядра находятся из уравнений:

$$\langle q \rangle = q \text{ для левой границы и оказываются равными } \bar{q} = \overleftarrow{3} \text{ и } \bar{q} = \overleftarrow{0};$$

Таблица 3

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 | \bar{q}_{(4)}$

		q	$\overleftarrow{3}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}3$
x_1	x_2	x_3					
0	0	0	$\overleftarrow{3},3$	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$
1	0	0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$
2	0	0	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
3	0	0	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$	$\overleftarrow{0}1,2$
0	1	0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$
1	1	0	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
...	...	...	...	...	...	...	...
1	1	1	$\overleftarrow{0}2,0$	$\overleftarrow{0}2,1$	$\overleftarrow{0}2,2$	$\overleftarrow{0}2,3$	$\overleftarrow{0}3,0$

$\rangle 21 + q \langle = q$ для правой границы и оказываются равными $\bar{q} = \overleftarrow{0}2$ и $\bar{q} = \overleftarrow{0}3$, так что верхняя часть и заключительная строка таблицы 3, задающей это устройство, имеет вид (полностью таблицу, разумеется, не приводим; 64 строки):

Видно, что глубинное ядро $Q_{nuc}^{(0)} = \{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \overleftarrow{0}2\}$, на котором происходит вычисление основной функции $f_0(x_1, x_2, x_3) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3$, позволяет вычислить сумму любых трех целых чисел. Про устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 | \bar{q}_{(4)}$ в принципиальном плане может быть сказано все то, что было сказано про предыдущие устройства. На этом можно больше не останавливаться. Для нас важно, сформулировать общий тезис и перейти к дальнейшим рассмотрениям.

Общий тезис: все устройства семейства, порождаемые тандемом (экстравертированность $\rightarrow$ свертка) из устройства $\bar{x} | \bar{q}_{(4)}$, однотипны и являются, в частности, сумматорами для одновременного сложения $\bar{n}$ чисел [2]–[5]. Единообразие порождения имеет следствием подобие структур этих устройств, проявляющее себя при всех способах задания устройств: при табличном способе задания, при задании с помощью формул, при задании В-схемами. Поэтому можно считать, что в первом приближении представление об устройстве $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{\bar{n}} | \bar{q}_{(4)}$ получено при любом $\bar{n}$.

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{\bar{n}} | \bar{q}_{(4)}$ и производные от него

Границы полного ядра находятся из уравнений:

$\rangle q \langle = q$ для левой границы и оказываются равными $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{0}$;

$\rangle 3 \cdot \bar{n} + q \langle = q$ для правой границы и оказываются равными $\bar{q} = \overleftarrow{n}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{\bar{n}}$.

Как видно, левая граница ядра для всех $\bar{n}$ определяется значениями $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{0}$; с $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ начинается левое внешнее экстравертирование, а $\bar{q} = \overleftarrow{0}$ — первое значение глубинного ядра.

Из уравнения $\rangle 3 \cdot \bar{n} + q \langle = q$ находится значение $\bar{q}$, с которого начинается правое внешнее экстравертирование (большой из двух корней, $\bar{q} = \overleftarrow{\bar{n}}$), а меньший из двух корней дает правую границу глубинного ядра, $\bar{q} = \overleftarrow{\bar{n}}$, где $\overleftarrow{\bar{n}}$ — предшествующее $\bar{n}$ число. Целевая, основная, функция $f_0(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{\bar{n}}) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{\bar{n}}$ вычисляется при постановке устройства в начальное состояние $\bar{q} = \overleftarrow{0}$, причем все переходы происходят в пределах глубинного ядра $Q_{nuc}^{(0)} = \{\overleftarrow{0}, \overleftarrow{0}1, \dots, \overleftarrow{\bar{n}}\}$. Состояния $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{\bar{n}}$ важны, т. к. с них начинается внешнее по отношению к глубинному ядру экстравертирование. Это особенно ясно на примере первого (т. е. когда $\bar{n} = 1$) устройства $\bar{x} | \bar{q}_{(4)}$, из глубинного ядра которого невозможно никакое экстравертирование. Ядерные состояния $\bar{q} = \overleftarrow{3}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{0}1$ индуцируют его внешнее экстравертирование.

Устройство $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{\bar{n}} | \bar{q}_{(4)}$ имеет бесконечно много однотипных производных устройств. Их можно считать побочными ответвлениями основной последовательности (1). Чтобы их получить,

разобьем множество $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{\bar{n}}\}$, ($\bar{n} = 1, 2, 3, \dots$) на группы:

$$\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{\bar{n}}\} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{\bar{n}_1}\} \cup \{\bar{x}_{\bar{n}_1+1}, \bar{x}_{\bar{n}_1+2}, \dots, \bar{x}_{\bar{n}_2}\} \cup \dots \cup \{\bar{x}_{\bar{n}_{p-1}+1}, \bar{x}_{\bar{n}_{p-1}+2}, \dots, \bar{x}_{\bar{n}_p}\}, \bar{n}_0 = 0$$

и в пределах каждой группы аргументы возьмем равными, [5]-[7]:

$$\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{\bar{n}}\} = \underbrace{\{\bar{x}_1, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_1\}}_{\bar{n}_1 \text{ раз}} \cup \underbrace{\{\bar{x}_2, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_2\}}_{\bar{n}_2 \text{ раз}} \cup \dots \cup \underbrace{\{\bar{x}_p, \bar{x}_p, \dots, \bar{x}_p\}}_{\bar{n}_p \text{ раз}}.$$

Тогда устройство будет вычислять функцию

$$f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p) = \bar{n}_1 \cdot \bar{x}_1 + \bar{n}_2 \cdot \bar{x}_2 + \dots + \bar{n}_p \cdot \bar{x}_p, \text{ где } \bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \dots + \bar{n}_p = \bar{n}.$$

Описанный переход от устройства $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{\bar{n}} | \bar{q}_{(4)}$ к устройству $f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p) | \bar{q}_{(4)}$ называется *сверткой по входам*. Ввиду бесконечности количества вариантов равенств $\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \dots + \bar{n}_p = \bar{n}$ ($\bar{n}$ произвольно), количество таким образом порожденных устройств также бесконечно. Среди этих устройств есть как известные, сумматоры (при $\bar{n}_1 = \bar{n}_2 = \dots = \bar{n}_p = 1$), так и не встречавшиеся ранее, сумматоры-вычитатели (если среди чисел $|\bar{n}_1| = |\bar{n}_2| = \dots = |\bar{n}_p| = 1$ есть числа разных знаков), скалярные произведения константного вектора $\vec{n}$ на произвольный вектор $\vec{x}$, умножители.

Остановимся на случае, когда $p = 1$. Тогда мы имеем дело с умножителем на константу [8]: $\bar{n} \cdot \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$. Его граничные состояния для глубинного ядра таковы: $\bar{q} = \overleftarrow{0}$ и $\bar{q} = \overleftarrow{n}$, т. е. в глубинном ядре всего $\bar{n}$ состояний. При $\bar{x} = \bar{n}$ происходит вычисление квадрата $\bar{n}^2$. Но это частное значение; регулярного вычисления функции $f(\bar{x}) = \bar{x}^2$ (т. е. одним устройством) не происходит. Тем не менее проследим за процессом вычисления $\bar{n}^2$ на последовательности устройств $\bar{n} \cdot \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$, взяв в качестве $\bar{n}$ значения 2, 3, ..., 101. Посмотрим, как выглядят вычислительные траектории в каждом из устройств.

$\bar{n} = 2$
Таблица 4
 $2 \cdot \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$

$\bar{q}$ $\bar{x}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$
1	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$
2	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
3	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}1,3$

$\bar{n} = 3$
Таблица 5
 $3 \cdot \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$

$\bar{q}$ $\bar{x}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$
1	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
2	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}1,3$	$\overleftarrow{0}2,0$
3	$\overleftarrow{0}2,1$	$\overleftarrow{0}2,2$	$\overleftarrow{0}2,3$

$\bar{n} = 10$
Таблица 6
 $10 \cdot \bar{x} | \bar{q}_{(4)}$

$\bar{q}$ $\bar{x}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}3$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$
1	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}1,3$
2	$\overleftarrow{0}2,0$	$\overleftarrow{0}2,1$	$\overleftarrow{0}2,2$	$\overleftarrow{0}2,3$
3	$\overleftarrow{0}3,0$	$\overleftarrow{0}3,1$	$\overleftarrow{0}3,2$	$\overleftarrow{0}3,3$

Соответствующие развертки при вычислении квадратов показаны ниже. Как видно, при вычислении квадратов используются не все возможности устройств. То, что используется, выделено заливкой. Содержимое остальных клеток устройств с точки зрения возведения в квадрат бесполезно, и мы их можем удалить. В результате получаются таблицы 4'-6', приспособленные только для возведения в квадрат. Они показаны под развертками.

Развертки:

вычисление 2^2			
$t \geq 2$	1	0	t
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	2	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	0	q
$\overleftarrow{0}$	1	0	y

вычисление 3^2			
$t \geq 2$	1	0	t
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}2$	0	q
$\overleftarrow{0}$	2	1	y

вычисление 10^2				
$t \geq 3$	2	1	0	t
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	1	0	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	0	0	q
$\overleftarrow{0}$	1	0	0	y

$\bar{n} = 2$

Таблица 4'

$2 \cdot 2 | \bar{q}_{(4)}$

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$
1		
2	$\overleftarrow{0}1,0$	
3		

$\bar{n} = 3$

Таблица 5'

$3 \cdot 3 | \bar{q}_{(4)}$

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$
0	$\overleftarrow{0},0$		$\overleftarrow{0},2$
1			
2			
3	$\overleftarrow{0}2,1$		

$\bar{n} = 10$

Таблица 6'

$10 \cdot 10 | \bar{q}_{(4)}$

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}3$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$		
1	$\overleftarrow{0}1,0$			
2				
3				

Замечательной особенностью этих таблиц является то, что их можно наложить друг на друга так, что выделенные клетки не будут «мешать» друг другу. В результате получится устройство, возводящее в квадрат числа из набора 2, 3, 10. Табличное задание этого устройства приведено в таблице 7.

Таблица 7

$\bar{x}^2 | \bar{q}_{(4)}, \bar{x} = 2, 3, 10$

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}2$
0	$\overleftarrow{0},0$	$\overleftarrow{0},1$	$\overleftarrow{0},2$
1	$\overleftarrow{0}1,0$		
2	$\overleftarrow{0}1,0$		
3	$\overleftarrow{0}2,1$		

Нетрудно проверить, что оно действительно возводит в квадрат числа 2, 3, 10.

Однако идея последовательного наложения устройств дальше не работает, поскольку нулевые состояния умножителей при больших $\bar{n}$ допускают лишь вариант *дизъюнктивного* наложения содержимого клеток таблицы, что требует дополнительного решения вопросов об идентификации. Вместо этого удобным оказывается введение копий нулевых состояний в итоговой таблице, как это показано далее. Таблица квадратора (будем так называть для краткости устройство, возводящее в квадрат) заметно растет в размерах, но это неизбежно, так как не существует конечного устройства, возводящего произвольное число в квадрат. Числа же, принадлежащие конечному множеству, могут быть возведены в квадрат конечным устройством, каковым и является приведенное далее устройство. Оно легко может быть реализовано в В-технологии даже при больших $\bar{n}$.

Далее приведен пример вычисления с помощью синтезированного устройства.

Пример 5. Пусть $\bar{x} = \overleftarrow{0}32$, $q = \overleftarrow{0}^{32}$. За вычислением следим с помощью приведенной далее развертки.

Таблица 8

$$\bar{x}^2 | \bar{q}_{(4)}, \bar{x} = 2, \dots, 101$$

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}^{11}$	$\overleftarrow{0}^{12}$	$\overleftarrow{0}^{13}$	$\overleftarrow{0}^{20}$	$\overleftarrow{0}^{21}$	$\overleftarrow{0}^{22}$	$\overleftarrow{0}^{23}$	$\overleftarrow{0}^{30}$	$\overleftarrow{0}^{31}$	$\overleftarrow{0}^{32}$
0	$\overleftarrow{0},0$								$\overleftarrow{0}^{30},0$		
1	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$				$\overleftarrow{0}2,1$				$\overleftarrow{0}3,1$	
2	$\overleftarrow{0}1,0$		$\overleftarrow{0}3,0$		$\overleftarrow{0}10,0$		$\overleftarrow{0}11,0$				$\overleftarrow{0}13,0$
3	$\overleftarrow{0}2,1$			$\overleftarrow{0}11,1$				$\overleftarrow{0}20,1$	$\overleftarrow{0}21,0$		

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}^{33}$	$\overleftarrow{0}^{100}$	$\overleftarrow{0}^{101}$	$\overleftarrow{0}1$	$\overleftarrow{0}^{101}1$	$\overleftarrow{0}2$	$\overleftarrow{0}3$	$\overleftarrow{0}10$	$\overleftarrow{0}^{101}10$	$\overleftarrow{0}11$
0		$\overleftarrow{0}^{100},0$		$\overleftarrow{0},1$		$\overleftarrow{0},2$	$\overleftarrow{0},3$	$\overleftarrow{0}1,0$	$\overleftarrow{0}^{101}1,0$	$\overleftarrow{0}1,1$
1		$\overleftarrow{0}10,0$	$\overleftarrow{0}^{101}10,1$	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}10,2$		$\overleftarrow{0}2,1$			$\overleftarrow{0}3,0$
2						$\overleftarrow{0}11,0$				$\overleftarrow{0}12,1$
3	$\overleftarrow{0}23,1$						$\overleftarrow{0}22,2$			

$\begin{smallmatrix} q \\ x \end{smallmatrix}$	$\overleftarrow{0}12$	$\overleftarrow{0}13$	$\overleftarrow{0}20$	$\overleftarrow{0}21$	$\overleftarrow{0}22$	$\overleftarrow{0}23$	$\overleftarrow{0}30$	$\overleftarrow{0}31$	$\overleftarrow{0}32$
0	$\overleftarrow{0}1,2$	$\overleftarrow{0}1,3$		$\overleftarrow{0}2,1$	$\overleftarrow{0}2,2$		$\overleftarrow{0}3,0$		$\overleftarrow{0}3,2$
1									
2			$\overleftarrow{0}13,2$						
3		$\overleftarrow{0}30,1$				$\overleftarrow{0}32,0$			

0	$t \geq 3$	2	1	0	t
	$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}$	3	2	x
$\overleftarrow{0}$	$\overleftarrow{0}3$	$\overleftarrow{0}30$	$\overleftarrow{0}13$	$\overleftarrow{0}^{32}$	$\bar{q}$
	3	0	1	0	y

Ответ: $\overleftarrow{0}32^2 = \overleftarrow{0}3010$.

Возможности синтеза устройств посредством метапереходов не ограничиваются разобранным случаем. Все изложенное без принципиальных проблем может быть реализовано в В-технологии.

ЛИТЕРАТУРА

- Деев Г. Е., Ермаков С. В. Би-бесконечный вычислительный автомат. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):52–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-6.
- Деев Г. Е. Свертка бесконечного автомата в конечный. *Вестник кибернетики*. 2016;1:9–24.
- Деев Г. Е. ТанDEM {свертка + экстравертность} как генератор бесконечного семейства автоматов. *Вестник кибернетики*. 2016;3:92–99.
- Деев Г. Е., Рахов Э. В. *Устройства для сложения числа с константой*: а.с. СССР (по заявке № 1278836), кл. G06 F7/50, бюл. № 47, 1986.
- Деев Г. Е. *Теория вычислительных устройств*. Санкт-Петербург: Лань; 2019. 452 с.
- Деев Г. Е., Ермаков С. В. В-компьютеры. *Вестник кибернетики*. 2018;1:143–148.
- Кальнова П. В. *Абстрактные вычислительные устройства. Параллельные вычисления по входу в семействе умножителей на константу*. Бакалаврская работа, 2017.
- Новиков А. В. *Построение массива умножителей для 6-ричной системы счисления и их обращений (делителей). Исследование би-бесконечного умножителя $4 * x | q_{(6)}$* . Магистерская диссертация, 2022.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ДВУНОГИХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов^а, И. Н. МIRONENKO^б

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru

^б mirotenko_in@mail.ru

Аннотация: рассматривается задача разработки методов и подходов для стабилизации движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Актуальность данной задачи заключается в том, что тестирование и отработку алгоритмов управления роботом целесообразно проводить в виртуальной среде на виртуальной модели. Это позволит в дальнейшем уменьшить риск поломки реальных роботов и сформировать правильное экспертное мнение об их применимости для выполнения важных работ. Предлагаемые решения рассматриваемой задачи основаны на построении регулятора с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков. В разработанном регуляторе обеспечение устойчивости движения робота реализуется с применением критерия точки нулевого момента и модели обратного маятника. При этом синтез управления двуногим шагающим роботом осуществляется с использованием скользящего режима. Такой подход не требует громоздких вычислений, решения нелинейных алгебраических уравнений и сложных матричных операций при реализации регулятора. Апробация предлагаемых в статье методов и подходов проводилась в системе виртуального окружения на примере выполнения роботом тушения пожара. Результаты апробации показали адекватность и эффективность предлагаемых решений для обеспечения равновесия двуногого шагающего робота в процессе его движения.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот, стабилизация, точка нулевого момента, обратная связь, скользящий режим, система виртуального окружения.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00371.

Для цитирования: Страшнов Е. В., МIRONENKO И. Н. Стабилизация движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09.

MOTION STABILIZATION OF BIPEDAL WALKING ROBOTS IN VIRTUAL ENVIRONMENT SYSTEMS

E. V. Strashnov^a, I. N. Mironenko^b

Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru

^b mirotenko_in@mail.ru

Abstract: the study is intended to develop methods and approaches for motion stabilization of bipedal walking robots in virtual environment systems. A virtual environment with virtual models is best suited for testing and refining robot control algorithms. This reduces the risk of the actual robot’s breakdown and facilitates making expert opinions on the robot’s applicability for critical operations. The proposed solutions use a controller with feedback from virtual sensors. The controller keeps the robot’s motion stable using the zero moment point criterion, and the inverted pendulum model. The sliding mode control is used. This approach does not require extensive calculations, solving nonlinear algebraic equations, or complex matrix operations by the controller. The proposed approach was proven with a virtual environment for a fire-extinguishing robot. The simulation ensures the balance of a bipedal walking robot as it moves.

Keywords: bipedal walking robot, stabilization, zero moment point, feedback, sliding mode, virtual environment.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR, project No. 20-07-00371.

Cite this article: Strashnov E. V., Mironenko I. N. Motion Stabilization of Bipedal Walking Robots in Virtual Environment Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09.

Введение

В последние годы в связи с развитием робототехники повышенный интерес представляют человекоподобные (антропоморфные) двуногие шагающие роботы (ДШР) [1, 2]. Это связано с тем, что такие роботы перемещаются посредством ходьбы и адаптированы для выполнения работ в условиях, предназначенных для деятельности человека. В отличие от колесных и гусеничных роботов, ДШР обладают возможностью функционировать внутри помещений и зданий, перешагивать препятствия, подниматься по лестнице, открывать двери и т. п. В связи с этим ДШР могут быть применены в медицине, образовании, торговле, быту, где необходимо выполнять несложные рутинные и повторяющиеся работы. Также отдельным направлением является экстремальная робототехника [3], которая рассматривает набор задач, где непосредственное участие человека невозможно или опасно для его здоровья. Предполагается, что в будущем ДШР сможет заменить человека при ликвидации последствий техногенных аварий и катастроф, тушении пожаров, строительстве лунной базы и т. д. Для успешного выполнения рассмотренных работ ДШР должен обладать навыками перемещения внутри рабочего пространства без падения. Поэтому разработка систем управления движением робота с сохранением равновесия является важной и актуальной задачей.

Развитие компьютерных технологий и вычислительных средств привело к тому, что системы виртуального окружения и виртуальной реальности активно применяются во многих областях науки и техники, включая робототехнику. Идея заключается в том, что в системах виртуального окружения реальные объекты заменяются на их виртуальные аналоги с реализацией компьютерного моделирования этих объектов в виртуальной среде. Апробация системы управления в таких системах позволит в дальнейшем уменьшить риск поломки реальных роботов и сформировать правильное экспертное мнение об использовании ДШР для выполнения целевых работ.

Задаче разработки систем управления движением ДШР посвящено множество публикаций [4–12]. Одним из распространенных подходов для реализации устойчивости перемещения робота является критерий точки нулевого момента (ТНМ) [13]. Его идея состоит в том, что для обеспечения движения ДШР без падения необходимо и достаточно, чтобы ТНМ, в которой скомпенсированы горизонтальные моменты, находилась внутри опорной площадки. Методы и алгоритмы управления движением ДШР, которые базируются на концепции ТНМ, включают генерацию шаблона ходьбы робота и стабилизацию. Первая часть относится к построению желаемых траекторий движения центра масс и ног робота [5–7]. В свою очередь, задача стабилизации заключается в коррекции шаблона ходьбы для обеспечения равновесия робота. Для решения этой задачи широкое распространение получил линейно-квадратичный регулятор с прогнозированием [4, 8, 9], в котором используются будущие значения ТНМ шаблона ходьбы. Недостатком такого подхода является необходимость решения нелинейных алгебраических уравнений и оптимизации параметров ходьбы при построении регулятора. В работе [10] был предложен регулятор на основе показаний датчика сил и модели линейного обратного маятника с запаздыванием значений ТНМ. При этом для эффективной реализации регулятора коэффициенты обратной связи выбираются путем назначения полюсов передаточной функции замкнутой системы [11]. Альтернативный подход рассмотрен в [12] на примере построения регулятора второго порядка с применением скользящего режима. Несмотря на обилие различных решений, разработке методов и подходов управления ДШР в системах виртуального окружения не уделено должного внимания.

В настоящей работе рассматриваются методы и подходы для стабилизации ДШР в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения основаны на синтезе регулятора с применением модели обратного маятника, описывающей зависимость координат ТНМ и координат центра масс робота. В разработанном регуляторе стабилизация осуществляется на основе релейного управления с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков и коррекцией заданного шаблона ходьбы. Апробация предложенных в статье решений была проведена в программном комплексе виртуального окружения VirSim [14] на примере управления движением виртуальной модели ДШР.

Постановка задачи

Антропоморфный, или двуногий шагающий робот представляет собой механическое устройство, которое по своему строению подобно человеку. Виртуальная модель такого робота показана на рис. 1. В этом роботе манипуляторы (руки) служат для захвата и переноса объектов, а педикуляторы (ноги) — для его перемещения. Исполнительными устройствами ДШР являются электрические приводы, которые установлены в сочленениях робота. Также робот оснащен датчиками для измерения координат (положений и ориентаций) его составных частей, сил и моментов в стопах и углов поворотов в шарнирах. Задача управления движением ДШР заключается в обеспечении его перемещения с сохранением равновесия. При этом предполагается, что робот может взаимодействовать с объектами (выполнять захват и их перенос), а его движение происходит по ровной поверхности.

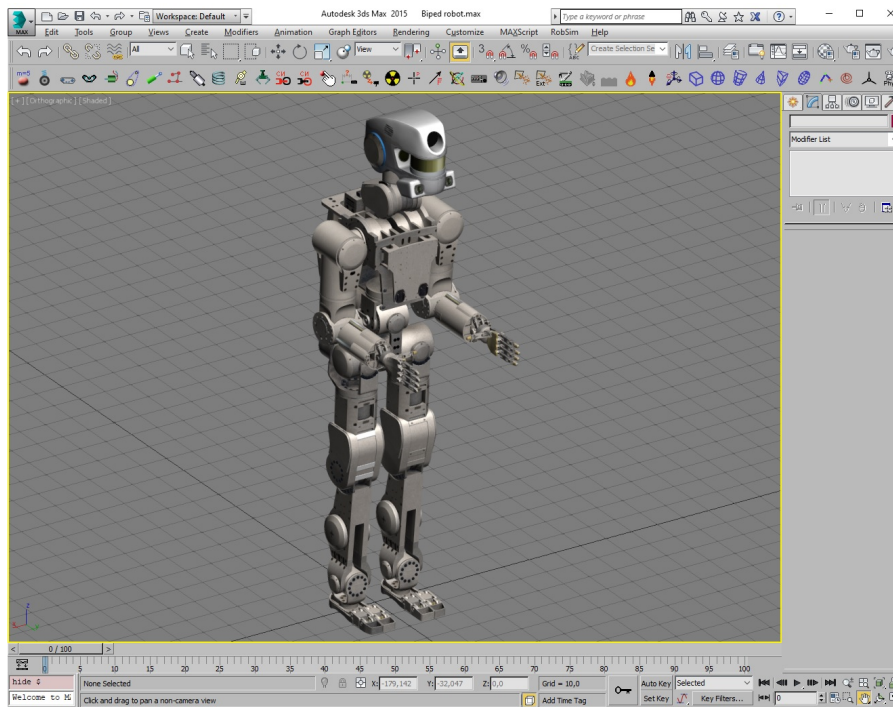


Рис. 1. Виртуальная модель ДШР в системе компьютерного моделирования 3ds Max

Предлагаемая система управления движением ДШР имеет структуру, которая показана на рис. 2. Управление роботом базируется на концепции критерия ТНМ для обеспечения его равновесия. Для этого реализуется вычисление координат ТНМ по показаниям датчиков в зависимости от типа контакта ног с поверхностью (одноопорная или двухопорная фаза). Так как полученные значения являются неточными, то для их фильтрации используются фильтры Баттерворта второго порядка [15]. Генерация шаблона ходьбы в рассматриваемой системе управления осуществляется в офлайн-режиме и включает расчет эталонных траекторий движения центра масс робота, его стоп и координат ТНМ. В свою очередь регулятор использует значения ТНМ в качестве входов, а на выходе формирует новые эталонные значения координат центра масс робота таким образом, чтобы равновесие робота сохранялось. Далее решается задача инверсной кинематики методом Левенберга–Марквардта [16] для вычисления целевых углов поворотов в шарнирах робота. Затем с помощью ПД-регуляторов осуществляется расчет напряжений, подаваемых на электроприводы робота, с обратной связью по показаниям датчиков углов в шарнирах.

Методы и подходы для генерации шаблона ходьбы ДШР, инверсной кинематики и синтеза ПД-регуляторов приведены в работах [17, 18]. Здесь же мы подробно рассмотрим метод вычисления ТНМ и реализацию синтеза регулятора для стабилизации робота.

Вычисление точки нулевого момента

В системе виртуального окружения вычисление координат ТНМ осуществляется посредством силомоментных датчиков, которые находятся в стопах ДШР. Рассмотрим расчет ТНМ для левой стопы робота (см. рис. 3). При контакте левой стопы с поверхностью на выходе датчиков формируется сила

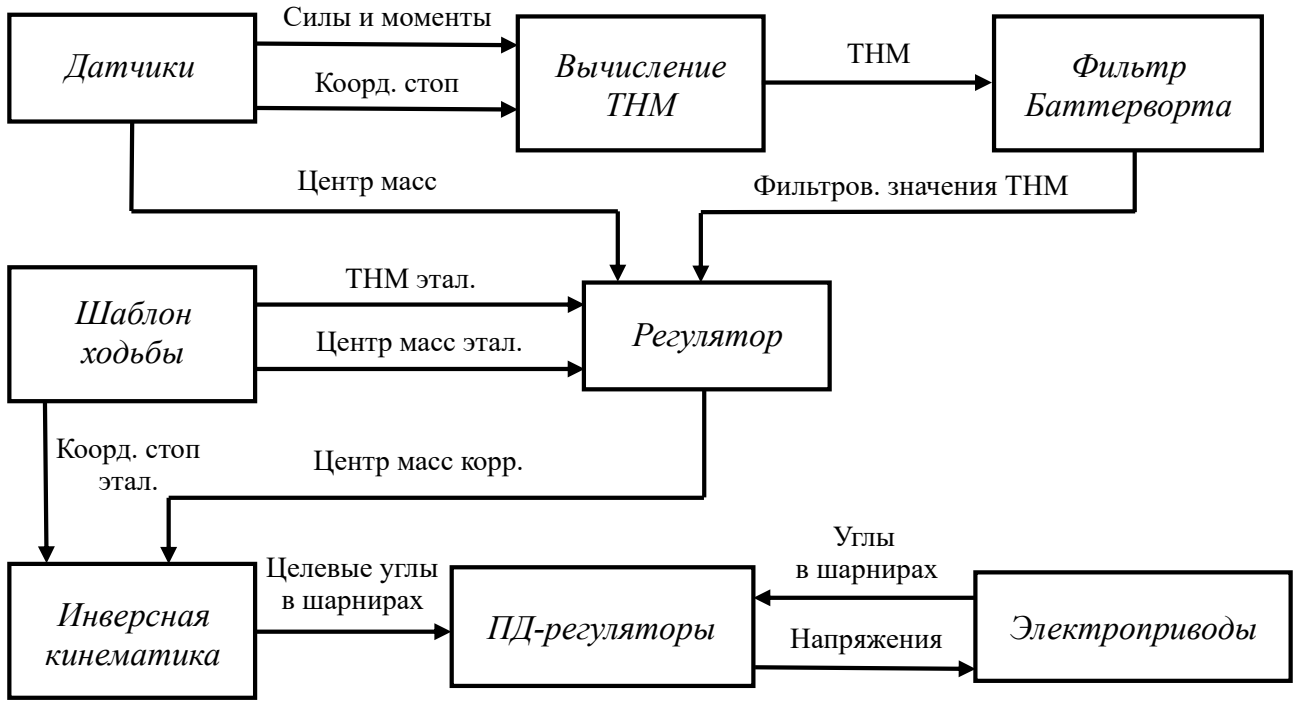


Рис. 2. Структура системы управления ДШР

F^L и момент τ^L . Пусть для определенности локальная система координат (ЛСК) $O_L x_L y_L z_L$ находится в центре поверхности стопы робота. Тогда согласно определению горизонтальные моменты в ТНМ равны нулю:

$$\tau_{ZMP,x} = -F_z^L p_{Ly}^{loc} + \tau_x^L = 0; \quad \tau_{ZMP,y} = F_z^L p_{Lx}^{loc} + \tau_y^L = 0,$$

где $(p_{Lx}^{loc}, p_{Ly}^{loc})$ — координаты ТНМ в ЛСК левой стопы, F_z^L — вертикальная компонента силы, τ_x^L и τ_y^L — горизонтальные моменты.

Отсюда верно, что координаты ТНМ для левой стопы вычисляются как

$$p_{Lx}^{loc} = -\tau_y^L / F_z^L; \quad p_{Ly}^{loc} = \tau_x^L / F_z^L. \quad (1)$$

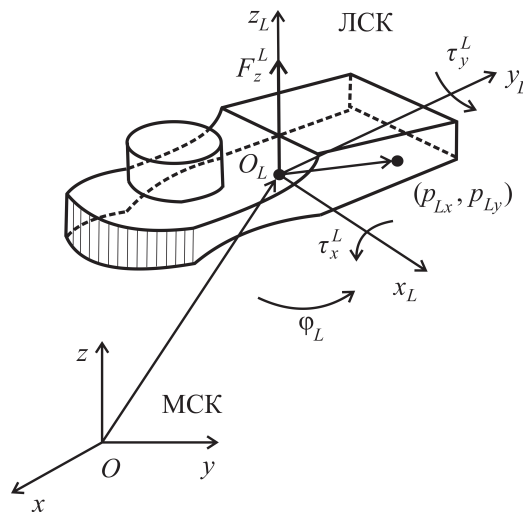


Рис. 3. Левая стопа робота

Так как координаты ТНМ должны находиться внутри опорной поверхности стопы, требуется обеспечить неравенства

$$|p_{Lx}^{loc}| \leq S/2; \quad |p_{Ly}^{loc}| \leq L/2, \quad (2)$$

где S — ширина стопы, L — длина стопы.

В мировой системе координат (МСК) $Oxyz$ координаты (p_{Lx}, p_{Ly}) ТНМ с учетом поворота стопы вычисляются следующим образом

$$p_{Lx} = x_L + p_{Lx}^{loc} \cos \phi_L - p_{Ly}^{loc} \sin \phi_L; \quad p_{Ly} = y_L + p_{Lx}^{loc} \sin \phi_L + p_{Ly}^{loc} \cos \phi_L, \quad (3)$$

где (x_L, y_L) — координаты левой стопы в МСК, ϕ_L — угол поворота левой стопы вокруг оси z .

Соотношения (1) — (3) используются для вычисления ТНМ в фазе опоры ДШР на левую ногу. Аналогичным образом вычисляются координаты (p_{Rx}, p_{Ry}) в фазе опоры робота на правую ногу. В случае двухопорной фазы контакта ДШР с поверхностью для вычисления координат ТНМ в МСК используются средневзвешенные значения:

$$p_x = \frac{p_{Lx}F_z^L + p_{Rx}F_z^R}{F_z^L + F_z^R}; \quad p_y = \frac{p_{Ly}F_z^L + p_{Ry}F_z^R}{F_z^L + F_z^R}, \quad (4)$$

где F_z^R — вертикальная компонента силы для правой стопы.

Вычисленные значения координат p_x и p_y ТНМ подвержены ошибкам моделирования. В связи с этим для фильтрации значений ТНМ в данной работе задействованы фильтры Баттерворта второго порядка, передаточная функция которых задается в следующем виде:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2} = \frac{1}{T^2 s^2 + \sqrt{2}Ts + 1},$$

где ω_c — частота среза, $T = 1/\omega_c$ — постоянная времени.

Фильтрованные значения p_x^f и p_y^f ТНМ используются далее для реализации обратной связи регулятора.

Стабилизация двуногого шагающего робота

Математическая модель динамики ДШР, который задается в виде системы шарнирно связанных тел, является сложной. Поэтому для построения управления роботом используются упрощенные модели. В данной работе задействована модель обратного маятника, которая выражает зависимость координат p_x и p_y ТНМ с координатами x и y центра масс робота [19]:

$$p_x = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x}; \quad p_y = y - \frac{z_c}{g} \ddot{y}, \quad (5)$$

где $z_c = \text{const}$ — расстояние между центром масс робота и поверхностью, g — ускорение свободного падения.

Рассмотрим построение регулятора на основе стабилизации движения ДШР вдоль оси x (фронтальная плоскость движения робота). Для этого введем управляющую переменную $u = \frac{d}{dt} \ddot{x}$ — производная от ускорения (рывок). Тогда с учетом первого соотношения из (5) движение ДШР описывается динамической системой

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u; \quad (6)$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \ddot{x}$, $k = z_c/g$ — константа.

Задача стабилизации заключается в том, что требуется обеспечить движение ДШР по траекториям, которые формируются на этапе генерации шаблона ходьбы: $x_1^d = x^d(t)$, $x_2^d = \dot{x}^d(t)$, $x_3^d = \ddot{x}^d(t)$, $p_x^d = p_x^d(t)$. При этом эталонное значение ТНМ удовлетворяет уравнению (7): $p_x^d = x_1^d - kx_3^d$. Введем

невязки $e_1 = x_1 - x_1^d$, $e_2 = x_2 - x_2^d$, $e_3 = p_x - p_x^d$ и продифференцируем их, согласно уравнениям (6) и (7). Тогда получим соотношения:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= e_2; \\ \dot{e}_2 &= (e_1 - e_3)/k; \\ \dot{e}_3 &= e_2 - k(u - \dot{x}_3^d).\end{aligned}$$

При использовании замен $w_1 = e_1$, $w_2 = e_2$ и $w_3 = \dot{e}_2$ эти уравнения приводятся к канонической форме:

$$\begin{aligned}\dot{w}_1 &= w_2; \\ \dot{w}_2 &= w_3; \\ \dot{w}_3 &= u - \dot{x}_3^d.\end{aligned}\tag{8}$$

Применим теорию скользящего режима управления [20] для динамической системы (8). Для этого рассмотрим переменную $\sigma(\mathbf{w}) = k_1 w_1 + k_2 w_2 + w_3$, где $\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3)^T$, $k_1 > 0$ и $k_2 > 0$. В рамках теории управления нелинейных систем задача сводится к тому, что требуется обеспечить $\sigma(\mathbf{w}) = 0$. После дифференцирования σ по времени t получим выражение

$$\dot{\sigma} = k_1 w_2 + k_2 w_3 + u - \dot{x}_3^d.\tag{9}$$

Рассмотрим положительно определенную функцию Ляпунова $V(\sigma) = \sigma^2/2$ и ее производную $\dot{V} = \sigma\dot{\sigma}$. Сформируем управление в следующем виде

$$u = -k_1 w_2 - k_2 w_3 - M \text{sgn} \sigma, \quad M > 0\tag{10}$$

и подставим его в $\dot{V}$ с учетом (9). Тогда согласно теории функции Ляпунова будет выполнено неравенство

$$\dot{V} = -\sigma(M \text{sgn} \sigma + \dot{x}_3^d) \leq -\alpha V^{1/2}, \quad \alpha > 0,$$

которое означает, что $\sigma \rightarrow 0$ за конечное время $t_r \leq 2V^{1/2}(0)/\alpha$ при выборе коэффициента $M = \rho + \alpha/\sqrt{2}$, где выполнено $|\dot{x}_3^d| \leq \rho$ для ограниченной функции $\dot{x}_3^d(t)$.

Закон управления вида (10) представляет собой нелинейное реле с обратной связью по показаниям ТНМ, координатам центра масс и скоростям робота. Интегрируя уравнения (6) для полученного управления, получим новое значение координаты $x_{corr}^d(t)$ шаблона ходьбы. Стабилизация ДШР вдоль оси y (сагиттальная плоскость движения робота) осуществляется аналогичным образом.

Результаты моделирования

Предложенные в статье решения для стабилизации ДШР были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim, разработанном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Этот программный комплекс включает в себя подсистемы управления, динамики и визуализации. В подсистеме управления осуществляется расчет управляющих сигналов для исполнительных устройств согласно функциональной схеме. Такая схема описывает логику управления виртуальными объектами и состоит из набора связанных блоков, куда входят блоки управляющих команд, датчиков, инверсной кинематики, фильтров и исполнительных устройств. Значения рассчитанных сигналов передаются в подсистему динамики, в которой реализуется вычисление новых координат виртуальных объектов на основе их математических моделей. Эти координаты затем передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены в масштабе реального времени с учетом светотеневой обстановки и моделирования визуальных эффектов. При этом обратная связь в рассматриваемом комплексе реализуется путем расчета в подсистеме динамики показаний виртуальных датчиков с их передачей в подсистему управления.

Апробация предложенных в статье методов и подходов проводилась на примере моделирования движения ДШР по ровной поверхности и решения задачи тушения огня. Для этого была создана виртуальная сцена помещения, содержащая набор виртуальных объектов (бочки, поддоны, шины и т. п.). Управление роботом в системе виртуального окружения было реализовано в супервизорном режиме [21]. Суть такого подхода состоит в том, что человек тем или иным образом задает команду (голосом, жестом или другим способом), а робот автоматически выполняет набор действий согласно заранее подготовленной программе. Движение ДШР по поверхности реализовано посредством модуля генерации шаблона ходьбы и включает перемещение робота вперед, его повороты и остановку. Для

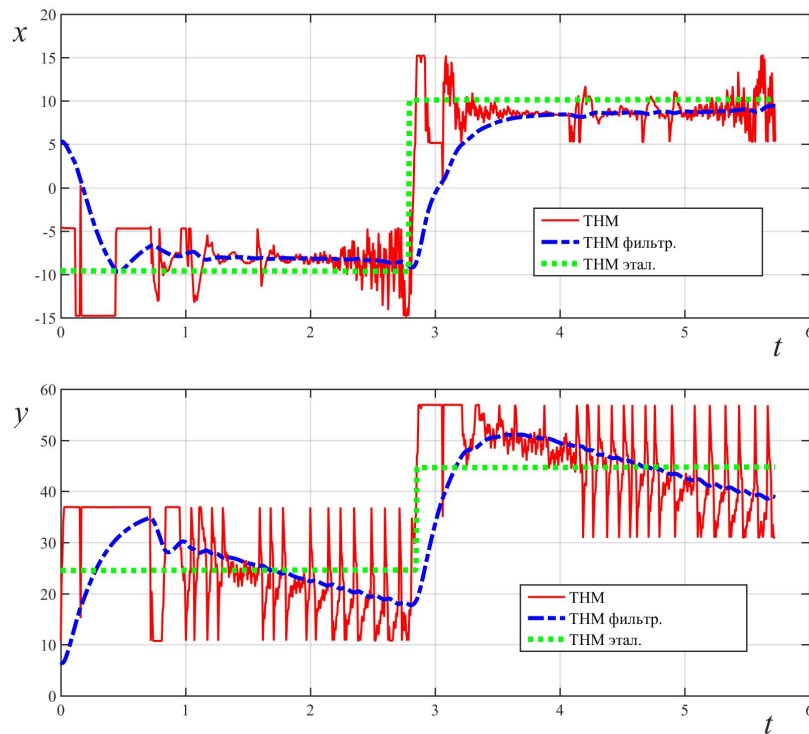


Рис. 4. Графики зависимостей координат ТНМ

моделирования были выбраны следующие параметры: $S = 10.3$ см, $L = 27.6$ см, $T = 0.1$ с, $z_c = 95$ см, $g = 9.81$ м/с², $M = 10000$, $k_1 = k_2 = 1$. На рис. 4 приводятся графики зависимостей текущих, фильтрованных и эталонных координат ТНМ вдоль осей x и y (в см) при выполнении роботом двух шагов вперед. Моделирование проводилось на примере решения задачи тушения огня, которая включает в себя захват роботом огнетушителя, движение робота по направлению к горящему объекту и операцию тушения огня (см. рис. 5). Результаты моделирования показали адекватность и эффективность предложенных в статье решений для стабилизации ДШР с учетом изменения его массы и движения составных частей.



Рис. 5. Тушение огня с помощью виртуальной модели ДШР

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы для стабилизации движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Построенный релейный регулятор с обратной связью по показаниям виртуальных датчиков обеспечивает устойчивость робота в процессе его движения с учетом изменения динамических параметров. Полученные в работе результаты могут быть использованы для решения различных практических задач в системах виртуального окружения, имитационно-тренажерных комплексах, образовательных приложениях, анимации и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saeedvand S., Jafari M., Aghdasi H. S., Baltes J. A Comprehensive Survey on Humanoid Robot Development. *The Knowledge Engineering Review*. 2019;34:1–18. DOI: 10.1017/S0269888919000158.
2. Mikolajczyk T. and others. Recent Advances in Bipedal Walking Robots: Review of Gait, Drive, Sensors and Control Systems. *Sensors*. 2022;22(12):1–31. DOI: 10.3390/s22124440.
3. Юревич Е. И. *Основы робототехники*: учеб. пособие, 4-е изд., перераб. и доп. СПб: БХВ-Петербург; 2017. 304 с.
4. Kajita S., Hirukawa H., Harada K., Yokoi K. *Introduction to Humanoid Robotics*. ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg; 2014. Vol. 101.
5. Taesin Ha, Chong-Ho Choi. An Effective Trajectory Generation Method for Bipedal Walking. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007;55:795–810. DOI: 10.1016/j.robot.2007.06.001.
6. Al-Shuka Hayder F. N., Allmendinger F., Corves B. and Wen-Hong Zhu. Modeling, Stability and Walking Pattern Generators of Biped Robots: a Review. *Robotica*. 2014;32:907–934. DOI: 10.1017/S0263574713001124.
7. Kajita S. and others. Biped Walking Pattern Generation Based on Spatially Quantized Dynamics. *IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics*. Birmingham, UK. 2017;599–605. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246933.
8. Хусаинов Р. Р., Климчик А. А., Магид Е. А. Метод управления движением двуногого шагающего робота по произвольной траектории. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018;19(10):633–641. DOI: 10.17587/mau.19.633-641.
9. Nishiwaki K., Kagami S. Strategies for Adjusting the ZMP Reference Trajectory for Maintaining Balance in Humanoid Walking. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2010;4230–4236. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5510002.
10. Kajita S., Morisawa M., Miura K., Nakaoka S., Harada K., Kaneko K., Kanehiro F., Yokoi K. Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. October 18–22, 2010, Taipei, Taiwan. 4489–4496. DOI: 10.1109/IROS.2010.5651082.
11. Sugihara T. Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism Based on the Best COM-ZMP Regulator. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009;1966–1971. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152284.
12. Campos-Macias L., Carbajal-Espinosa O., Lokianov A., Bayro-Corrochano E. Stabilization Method for Dynamic Gait in Bipedal Walking Robots. *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. Cancun, Mexico. 2016;1276–1281. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803434.
13. Vukobratovic M. Zero-Moment Point — Thirty-Five Years of Its Life. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004;1:157–173. DOI: 10.1142/S0219843604000083.
14. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
15. Сорокин Г. А. Фильтры нижних частот. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2015;15(1):100–107.
16. Sugihara T. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics Based on Levenberg-Marquardt Method with Robust Damping. *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Paris, France. 2009;555–560. DOI: 10.1109/ICHR.2009.5379515.
17. Страшнов Е. В. Инверсная кинематика для управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Труды НИИСИ РАН*. 2021;11(3):41–47. DOI:

10.25682/NIISI.2021.3.0009.

18. Страшнов Е. В., Финагин Л. А. Моделирование полуавтоматического режима управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2022;3(17):57–67. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-3-57-67.
19. Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H. Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2003;1620–1626. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241826.
20. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser; 2013.
21. Михайлюк М. В., Омельченко Д. В., Страшнов Е. В. Командный и супервизорный режимы управления виртуальными роботами. *Вестник кибернетики*. 2016;4:67–72.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-10

**ПРИМЕНИМОСТЬ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ****В. А. Галкин^а, Т. В. Гавриленко^б, А. Д. Смородинов^в, О. П. Бобровская^г***Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация**Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
г. Сургут, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, sachenka_1998@mail.ru^г ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, o-bobrovskaya@mail.ru

Аннотация: в статье рассматриваются существующие роевые алгоритмы, приводятся их особенности. Подробно описывается алгоритм роя частиц, обеспечивающий оптимизацию функции. Проводятся эксперименты с различными параметрами роевого алгоритма (размера роя и времени жизни роя) для функций разных классов, как с одной точкой минимума, так и с несколькими. Делаются выводы о применимости алгоритма роя частиц для решения задач оптимизации.

Ключевые слова: роевой интеллект, роевой алгоритм, алгоритм роя частиц, минимизация функции, максимизация функции, поиск точек экстремума функций.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № FNEF-2022-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления», рег. № 1021060909180-7-1.2.1.

Для цитирования: Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Смородинов А. Д., Бобровская О. П. Применимость алгоритмов роевого интеллекта для решения задач минимизации функций разных классов. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):84–97. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-10.

**SWARM INTELLIGENCE ALGORITHMS APPLICABILITY FOR MINIMIZING VARIOUS
FUNCTIONS****V. A. Galkin^a, T. V. Gavrilenko^b, A. D. Smorodinov^c, O. P. Bobrovskaya^d***Surgut State University, Surgut, Russian Federation**Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, taras.gavrilenko@gmail.com^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9324-1844>, sachenka_1998@mail.ru^г ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, o-bobrovskaya@mail.ru

Abstract: this study considers the existing swarm intelligence algorithms and their features. The particle swarm algorithm used for function optimization is described in detail. We adjusted various swarm algorithm properties (swarm size and lifetime) for minimizing functions of different classes, both with one and multiple minimums. It was found that the particle swarm algorithm is applicable to solving optimization problems.

Keywords: swarm intelligence, swarm algorithm, particle swarm algorithm, function minimization, function maximization, function extremum seeking.

Acknowledgements: this study is a part of the government contract 47 GP with the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. FNEF-2022-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods, reg. № 1021060909180-7-1.2.1.

Cite this article: Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Smorodinov A. D., Bobrovskaya O. P. Swarm Intelligence Algorithms Applicability for Minimizing Various Functions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):84–97. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-10.

Введение

Несколько десятилетий назад появилось новое направление в разработке искусственного интеллекта — роевой интеллект. **Роевой интеллект** (англ. Swarm intelligence) описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Изучается в теории искусственного интеллекта как особый метод решения задач оптимизации. Впервые подобная идея была рассмотрена Станиславом Лемом в романе «Непобедимый» (1964) и эссе «Системы оружия двадцать первого века, или Эволюция вверх ногами» (1983). Термин был введен Херардо Бени и Ван Цзином в 1989 году [1] в контексте системы клеточных автоматов (роботов).

Роевой интеллект обычно создается как множество агентов, которые локально взаимодействуют между собой и окружающей средой. Поведение алгоритма строится на основе некоторых реальных объектов природы, чаще всего за основу берут биологическую систему. Каждый исследователь, работающий с роевыми алгоритмами, дает свое наименование элементам роя, например, частица, боид, квант — все это синонимы к словосочетанию «элемент роя». В некоторых случаях элемент роя могут называть муравьем или волком, если речь идет о муравьином алгоритме или алгоритме серых волков соответственно. В данной работе элемент роя будет именоваться частицей. Выбор этого синонима обоснован несколькими причинами: во-первых, понятия «боид» и «квант» введены зарубежными авторами и русскоязычным читателям, которые впервые знакомятся с данной темой, могут быть непонятны. Частица же достаточно распространенное и точное наименование элемента роя. Во-вторых, именно такое название используется в базовом роевом алгоритме (рое частиц).

Обычно у роя нет центра управления, который предписывал бы каждому элементу роя, что ему делать в данный момент. Каждая частица подчиняется достаточно простым правилам, но все равно локальные взаимодействия с внесением небольшой случайной составляющей приводят к возникновению группового поведения, которое неподконтрольно отдельным частицам роя. В настоящий момент не существует точного определения роевого интеллекта, есть только набор условий, при соответствии которым алгоритм можно назвать роевым [2]:

1. Роевой интеллект должен представлять собой многоагентную систему.
2. Система должна обладать самоорганизующимся поведением.
3. Поведение роя должно иметь признаки «разумного» поведения.

Первые два условия достаточно очевидны: система должна состоять из нескольких частиц, которые подчиняются некоторым правилам, формируемым создателем роя, третье же не так однозначно. Достаточно сложно определить, является ли поведение созданного роя «разумным». Единственное, что можно сказать определенно — поведение роя должно отличаться от алгоритма случайного перебора.

Роевые алгоритмы применяются для решения задач, которые обладают следующими особенностями [3]:

- 1) нелинейность;
- 2) недифференцируемость;
- 3) многоэкстремальность;
- 4) овражность;
- 5) отсутствие аналитического выражения;
- 6) высокая вычислительная сложность;
- 7) высокая размерность пространства поиска;
- 8) сложная топология области допустимых значений.

Рой можно определить как децентрализованную систему, которая состоит из простых и однообразных элементов, взаимодействующих между собой определенным образом. Примерами из реального биологического мира могут служить колонии муравьев, рой пчел, стаи птиц или косяки рыб. С концептуальной точки зрения такие алгоритмы строятся на эффекте аддитивности и синергии, который проявляет себя при объединении частиц в одну систему.

На данный момент известно не менее 22 различных алгоритмов роя:

1. Метод роя частиц.
2. Генетический алгоритм.
3. Муравьиный алгоритм.
4. Пчелиный алгоритм.
5. Искусственная иммунная система.

6. Алгоритм серых волков.
7. Алгоритм летучих мышей.
8. Алгоритм гравитационного поиска.
9. Алгоритм альтруизма.
10. Светляковый алгоритм.
11. Алгоритм капель воды.
12. Метод формирования реки.
13. Метод самоходных частиц.
14. Стохастический диффузионный поиск.
15. Многороевая оптимизация.
16. Алгоритм кукушки (кукушкин поиск).
17. Оптимизация передвижением бактерий.
18. Обезьяний алгоритм.
19. Поиск косяком рыб.
20. Тасующий алгоритм роя лягушек.
21. Электромагнитный поиск.
22. Гармонический поиск.

Это неполный перечень, который постоянно дополняется новыми алгоритмами или модификациями старых. Изначально авторы многих алгоритмов не относили их к роевым, раньше некоторые алгоритмы носили название поведенческий, интеллектуальный метаэвристический, вдохновленный (инспирированный) природой, многоагентный, популяционный. В настоящий момент все эти алгоритмы объединены под одним названием — роевой интеллект.

Далее в данной работе будет рассмотрен базовый алгоритм роя частиц и проведена серия численных экспериментов, в которых будет изучена применимость данного алгоритма для решения задач минимизации функций разных классов.

Метод роя частиц

Базовый алгоритм роя частиц — это метод численной оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции. Впервые он был показан Кеннеди, Эберхартом и Ши [4, 5, 6], и изначально предназначался для имитации социального поведения. В дальнейшем алгоритм был упрощен и было замечено, что он пригоден для решения задач оптимизации. Обширное исследование способов применения было сделано Поли [7, 8]. Метод роя частиц оптимизирует функцию, поддерживая популяцию возможных решений, называемых частицами и перемещая эти частицы в пространстве решений согласно простой формуле. Перемещения подчиняются принципу наилучшего найденного в этом пространстве положения, которое постоянно изменяется при нахождении частицами более выгодных положений [9]. Если говорить о данном методе с точки зрения математического аппарата, то алгоритм можно описать следующим образом:

Шаг 0:

1. Задается оптимизируемая функция — $F(X)$.
2. Выбирается тип задачи (максимум, минимум).
3. Определяется область решения — $G(X)$.
4. Выбирается критерий остановки.
5. Выбирается размер роя — n .
6. Указывается максимальная и минимальная скорость роя — (V_{min}, V_{max}) .
7. Указываются гиперпараметры:
 - 1) характеристика инерционного свойства частицы — Om ;
 - 2) коэффициент, определяющий степень учета индивидуального опыта, — A_1 ;
 - 3) коэффициент, определяющий степень учета группового опыта, — A_2 .

Шаг 1: Генерация начальных положений и скоростей частиц роя $j = 1$ по формулам:

$$X_{i1} = \text{rand}(G(X)), \quad i = 1, \dots, n, \quad \text{где } n — \text{ количество частиц в рое} \quad (1)$$

$$v_{i1} = \text{rand}(V_{min}, V_{max}), \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$X_{i1}^{best} = X_{ij}$ — сгенерированная точка считается «лучшей», в которой побывала частица.

Случайным образом выбирается лучшая точка роя $M = X_{i1}^{best}$, где i — произвольная частица на первой итерации.

Шаг 2: Перемещение частиц

$$V_{ij+1} = V_{ij} \cdot Om + A_1 \cdot (X_{ij}^{best} - X_{ij}) \cdot \text{rand}(0,1) + A_2 \cdot (M - X_{ij}) \cdot \text{rand}(0,1) \quad (3)$$

$$V_{ij+1} = \begin{cases} V_{ij+1}, & V_{min} \leq V_{ij+1} \leq V_{max} \\ V_{min}, & V_{ij+1} \leq V_{min} \\ V_{max}, & V_{ij+1} \geq V_{max}. \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{ij+1} = \begin{cases} X_{ij} + V_{ij+1}, & G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 1 \\ X_{ij}, & G(X_{ij} + V_{ij+1}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Шаг 3: Определение лучшего положения частицы в рое

Определяется, является ли текущее положение частицы лучшим, чем предыдущее:

$$X_{ij}^{best} = X_{ij}, \quad F(X_{ij}^{best}) < F(X_{ij}) \quad (6)$$

Определяется, является ли лучшее положение какой-либо частицы роя лучшим во всем рое:

$$M = X_{ij}^{best}, \quad F(M) < F(X_{ij}^{best}). \quad (7)$$

Шаг 4: Проверка критериев остановки:

1. Время жизни роя закончилось (количество шагов либо время в секундах).
2. Лучшая частица роя перестала изменяться на протяжении M шагов.

Если критерий остановки не достигнут, то возвращаемся к шагу 2.

Далее опишем результаты численных экспериментов, которые показывают возможность применения данного алгоритма к решению задач минимизации и максимизации (на примере задачи минимизации).

Эксперимент 1

В данном эксперименте рассматривалась следующая функция:

$$F(x) = -e^{-0.1 \cdot x} \cdot \sin^2 x \quad (8)$$

$$F'(x) = -e^{-0.1x} (\sin 2x - 0.1 \sin^2 x) \quad (9)$$

при $F'(x) = 0$

$x = \pi k$ — точки максимума

$x = \arctg(20) + \pi k$ — точки минимума

График функции на отрезке от -107 до 5 с шагом 0.01 представлен на рис. 1.

На данном промежутке 36 точек минимума, проверим, сможет ли рой найти минимальное значение функции. Для этого в рамках эксперимента было проведено несколько серий вычислений. Значения гиперпараметров для данного эксперимента следующие:

- минимальная и максимальная скорость движения частицы 0.05 ;
- коэффициент инерции 1.3 ;
- коэффициент учета индивидуального опыта 2 ;
- коэффициент учета группового опыта 3 .

Первая серия вычислений заключалась в следующем: 25 раз генерировали рой размером 100 , количество шагов роя (время жизни роя) равнялось 1000 . В табл. 1 приведены полученные результаты.

При такой конфигурации роя он может найти в 21 из 25 случаев минимальное значение функции.

Проведем следующую серию экспериментов и уменьшим размер роя в 10 раз, увеличив время жизни в 10 раз, что в теории должно компенсировать уменьшение размера роя, т. к. общее количество

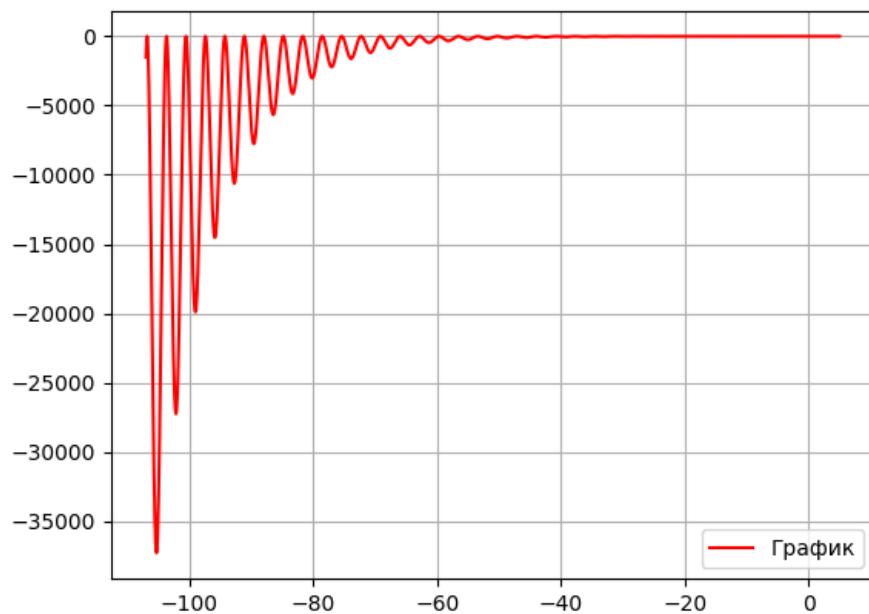


Рис. 1. График функции $F(x) = -e^{-0.1 \cdot x} \cdot \sin^2 x$ на промежутке от -107 до 5

Таблица 1

Результаты эксперимента при размере роя 100 и времени жизни 1000 шагов

Значение X	Значение функции F(X)	Значение X	Значение функции F(X)
-105.289	-37302.539	-105.263	-37269.007
-105.292	-37303.148	-105.295	-37303.058
-105.294	-37303.124	-105.295	-37303.081
-105.293	-37303.187	-105.287	-37302.011
-105.294	-37303.174	-105.292	-37303.145
-102.153	-27246.286	-105.293	-37303.198
-105.292	-37303.154	-105.293	-37303.196
-102.151	-27246.355	-105.294	-37303.164
-105.292	-37303.141	-102.142	-27243.831
-105.252	-37239.924	-105.293	-37303.195
-105.292	-37303.171	-102.148	-27246.122
-105.291	-37303.036	-102.151	-27246.353
-102.152	-27246.347		

Таблица 2

Результаты эксперимента при размере роя 10 и времени жизни 10000 шагов

Значение X	Значение функции F(X)	Значение X	Значение функции F(X)
-77.069	-2201.439	4.663	-0.625
-106.987	-1311.099	-36.182	-37.162
-106.998	-1490.949	-77.012	-2206.934
-45.600	-95.373	-17.360	-5.637
-106.999	-1493.358	-106.986	-1297.356
4.672	-0.625	-86.406	-5656.035
-95.881	-14533.024	-45.603	-95.374
-86.423	-5661.593	-106.999	-1505.936
-106.985	-1290.114	-89.587	-7754.534
-39.320	-50.881	-105.297	-37302.570
-66.081	-8.602	-106.998	-1476.886
-89.590	-7754.371	-106.996	-1453.808
-85.719	-3220.200		

шагов роя (каждая частица роя делает 1000 шагов, частиц 100, значит, шагов роя 100 000, в новом эксперименте каждая частица будет делать 10000 шагов, но частиц всего 10, общее количество шагов 100 000) остается неизменным. Результаты серии вычислений представлены в таблице 2.

В данном случае правильный ответ дал только 1 рой из 25, из чего можно сделать вывод, что компенсировать размер роя временем жизни нельзя.

Далее проведем эксперимент, в котором уменьшим относительно первой серии вычислений время жизни в 10 раз, при этом увеличив в 10 раз размер роя (табл. 3).

Таблица 3

Результаты эксперимента при размере роя 1000 и времени жизни 100 шагов

Значение X	Значение функции F(X)	Значение X	Значение функции F(X)
-105.292	-37303.187	-105.292	-37303.193
-105.283	-37299.738	-105.290	-37302.888
-105.294	-37303.172	-105.293	-37303.196
-105.292	-37303.172	-105.293	-37303.198
-105.292	-37303.191	-105.293	-37303.198
-105.295	-37302.957	-105.292	-37303.191
-105.294	-37303.159	-105.293	-37303.198
-105.292	-37303.191	-105.291	-37303.113
-105.292	-37303.151	-105.291	-37303.026
-105.294	-37303.173	-105.292	-37303.181
-105.292	-37303.189	-105.293	-37303.195
-105.293	-37303.197	-105.343	-37210.404
-105.289	-37302.749		

На рис. 2 представлен график, наглядно изображающий приведенные в таблицах 1–3 значения X и Y, на которых остановился роевой алгоритм.

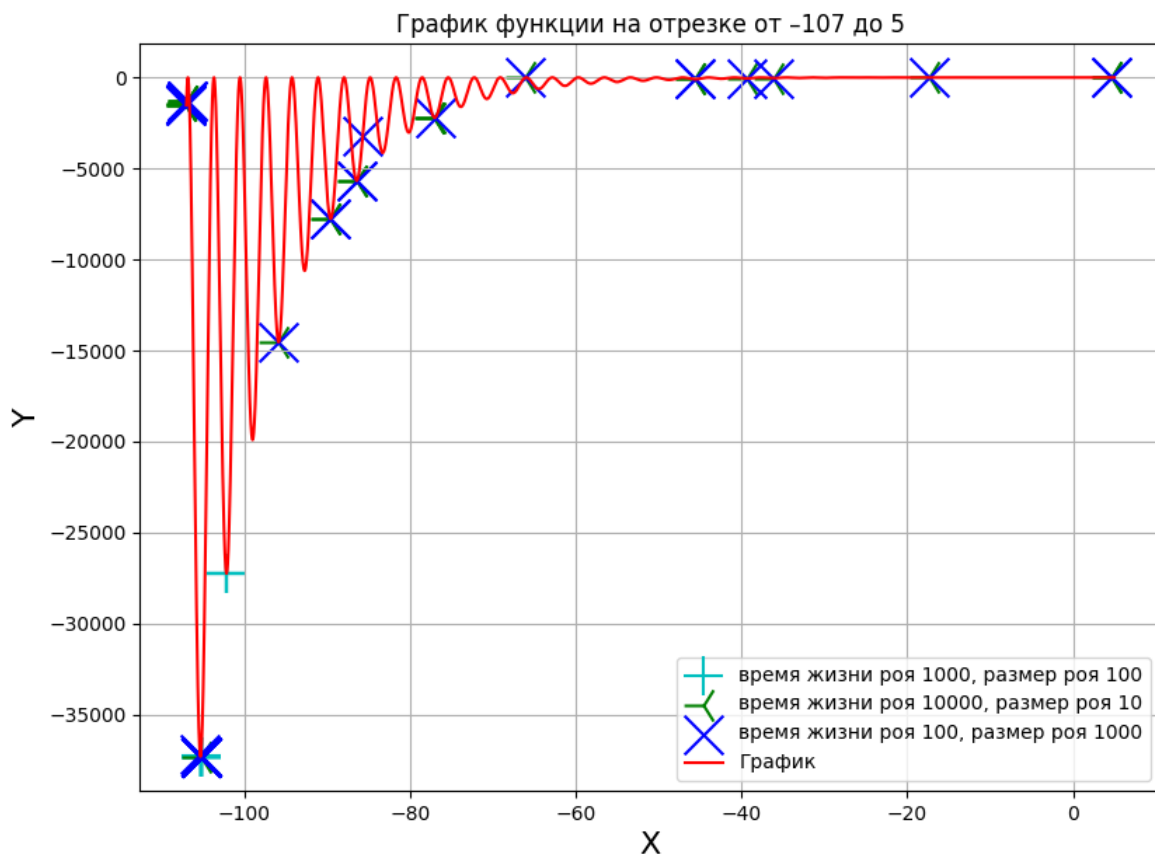


Рис. 2. Найденные роем значения минимума

Как видно из таблицы 4 и графика, почти каждый рой находит правильную точку. Но здесь необходимо учесть тот факт, что некоторые частицы роя могут изначально находиться в окрестности точки минимума.

Количество частиц роя, которые будут находиться в пределах от -106 до -104 при генерации в промежутке от -107 до 5 при равновероятном распределении, представлено в таблице 4.

Таблица 4

Количество частиц в заданном промежутке в зависимости от размера роя

Размер роя	Количество частиц в заданном пределе	Размер роя	Количество частиц в заданном пределе	Размер роя	Количество частиц в заданном пределе
10	0	100	4	1000	17
10	0	100	1	1000	18
10	0	100	0	1000	16
10	2	100	1	1000	17
10	0	100	0	1000	24
10	0	100	2	1000	19
10	1	100	2	1000	23
10	0	100	3	1000	12

Как видно из данной таблицы, при размере роя в 1000 частиц как минимум 12 частиц находится в заведомо выигрышном положении, а следовательно, нельзя говорить о том, что при 1000 частицах правильную точку находит рой, т. к. это есть не что иное, как простой перебор точек.

Но при размере роя в 100 частиц можно с уверенностью сказать, что рой может решить задачу минимизации при наличии нескольких (или бесконечного числа) точек экстремума.

Эксперимент 2

Далее проведем серию вычислений на двумерных мультимодальных функциях:

$$f(x, y) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{0.5(x^2 + y^2)} \right) - \exp(0.5 \cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)) + e + 20 - \text{функция Экли.} \quad (10)$$

На промежутке от -5 до 5 глобальный минимум $f(0,0) = 0$ (рис. 3).

На рис. 3 изображен график функции.

Для данных серий вычислений минимальную и максимальную скорость установили в значение 0.1, остальные коэффициенты оставили без изменений.

В первой серии вычислений размер роя равнялся 100 частицам, а время жизни роя составляло 1000 шагов. Ниже приведена таблица 5 результатов роя, по которым видно, что алгоритм роя частиц нашел глобальный минимум функции Экли.

Как видно из результатов проведенной серии экспериментов, почти все сгенерированные рои нашли точку минимума с точностью не ниже 10^{-2} . Но стоит учесть, что 100 частиц достаточно много и некоторые частицы роя могли изначально находиться в окрестности точки ноль, поэтому уменьшим количество частиц в рое до 15, оставив время жизни роя без изменения (табл. 6).

Как видно из проведенной серии вычислений, количество роев, которые нашли точку с точностью 10^{-2} , снизилось, но тем не менее шанс изначального попадания частицы роя в окрестность точки минимума все еще достаточно велик, поэтому уменьшим размер роя до 10. Результаты вычислений представлены в таблице 7 [9].

График найденных роем значений, приведенных в таблицах 5–7, представлен на рис. 4.

Как видно, уже при 10 частицах в рое количество роев, давших правильный ответ, равняется 3, среди которых лишь один рой, нашедший точку минимума с точностью 10^{-2} . При этом в данном варианте частица с очень низкой вероятностью изначально находится в окрестности точки $(0,0)$. Из этого можно сделать вывод, что количество частиц в рое является ключевым параметром, определяющим успешность работы алгоритма. Можно с уверенностью сказать, что использование роевого алгоритма для решения задачи минимизации функции такого класса возможно.

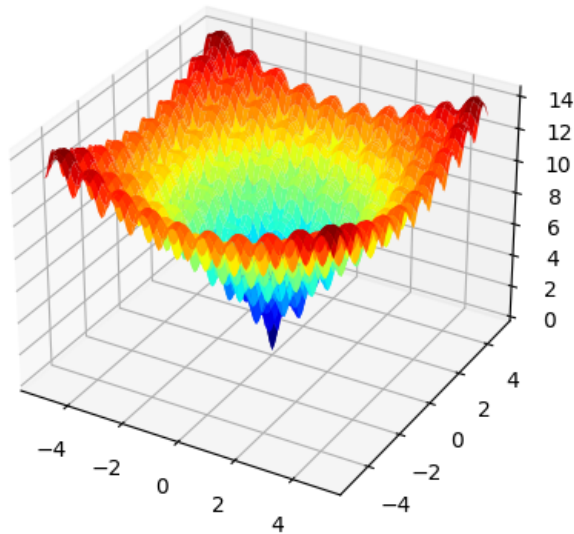


Рис. 3. График функции Экли на промежутке от -5 до 5

Таблица 5

Результаты эксперимента при размере роя 100 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
0.0023	0.004	0.014	-0.002	0.004	0.013
-0.007	0.021	0.078	0.011	0.003	0.037
0.003	-0.0001	0.008	-0.005	-0.006	0.023
0.002	-0.017	0.057	0.005	0.004	0.019
-0.002	0.002	0.009	0.001	-0.001	0.004
0.001	-0.001	0.004	-0.004	0.003	0.015
-0.002	-0.001	0.005	0.003	-0.008	0.027
0.002	0.001	0.005	-0.010	0.001	0.033
-0.002	0.005	0.017	.003	0.005	0.018
-0.007	-0.006	0.028	0.013	0.008	0.049
-0.001	0.003	0.010	-0.004	0.004	0.016
-0.001	0.005	0.014	0.001	0.004	0.011
0.001	0.006	0.017			

Эксперимент 3

Далее посмотрим, как себя поведет рой, если точек минимума будет несколько.

$$f(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2 \quad \text{— функция Химмельброу.} \quad (11)$$

На промежутке от -5 до 5 глобальные минимумы (рис. 5):

$$f(3.0; 2.0) = 0$$

$$f(-2.805118; 3.131312) = 0$$

$$f(-3.779310; -3.283186) = 0$$

$$f(3.584428; -1.848126) = 0.$$

Как и в прошлом эксперименте, вычисления начнем с роя размером 100 частиц. Результаты вычислений представлены в таблице 8.

Таблица 6

Результаты эксперимента при размере роя 15 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
0.0001	-0.016	0.052	-0.006	-0.046	0.187
-0.043	0.025	0.207	0.007	-0.025	0.09
-0.003	0.013	0.042	-0.011	0.0111	0.051
0.010	-0.018	0.068	-0.002	0.00005	0.006
0.029	-0.074	0.388	-0.048	0.003	0.197
-0.003	0.131	0.771	-0.022	-0.002	0.077
0.011	-0.029	0.112	0.006	0.011	0.04
-0.080	0.097	0.739	-0.016	0.004	0.053
-0.0377	-0.045	0.255	-0.118	0.105	1.012
-0.001	0.029	0.103	0.0318	-0.022	0.149
-0.051	0.022	0.235	-0.020	0.012	0.079
0.0152	0.022	0.094	-0.0004	0.003	0.012
0.012	-0.003	0.04			

Таблица 7

Результаты эксперимента при размере роя 10 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
-0.023	-0.002	0.078	0.0860	-0.801	3.075
0.0196	4.910	10.225	4.923	0.007	10.184
-0.958	-1.979	5.403	4.993	-2.986	11.222
1.078	2.056	5.834	-0.050	0.022	0.236
1.005	4.925	10.32	-2.081	4.937	10.887
0.0182	-4.914	10.214	-1.027	-4.918	10.362
-4.967	4.922	12.743	0.906	-3.599	9.876
-0.008	-4.950	10.136	-4.923	0.007	10.183
-4.924	-1.028	10.348	0.139	-0.048	0.915
4.926	-0.0273	10.194	-4.91	-1.975	10.757
0.03	-4.947	10.162	-4.917	-2.035	10.782
0.0293	0.013	0.117	-4.945	-0.943	10.348
-0.069	1.954	5.009			

Как видно, рой справился с задачей, но, помня предыдущий эксперимент, проведем еще две серии вычислений с размером роя 15 и 10; результаты представлены в таблице 9.

На рис. 6 представлены приведенные в таблицах 8–9 значения, которые были найдены роем.

Размер роя был уменьшен до 15, а потом и до 10, как и при работе с предыдущей функцией. Но можно заметить, что с данной функцией рой справился лучше. Количество роев, которые дали правильный ответ с точностью 10^{-2} , в 10 раз больше. Данный факт можно объяснить тем, что шанс попасть в окрестность точки минимума выше в 4 раза. Поэтому возьмем другую функцию, в которой расширим область поиска в два раза по каждой координате.

Эксперимент 4

$$-\left| \sin x \cdot \cos y \cdot \exp \left(\left| 1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\pi} \right| \right) \right| \quad - \text{функция Хольдера.} \quad (12)$$

На промежутке от -10 до 10 глобальный минимум (рис. 7):

$$f(8.05502; 9.66459) = -19.2085$$

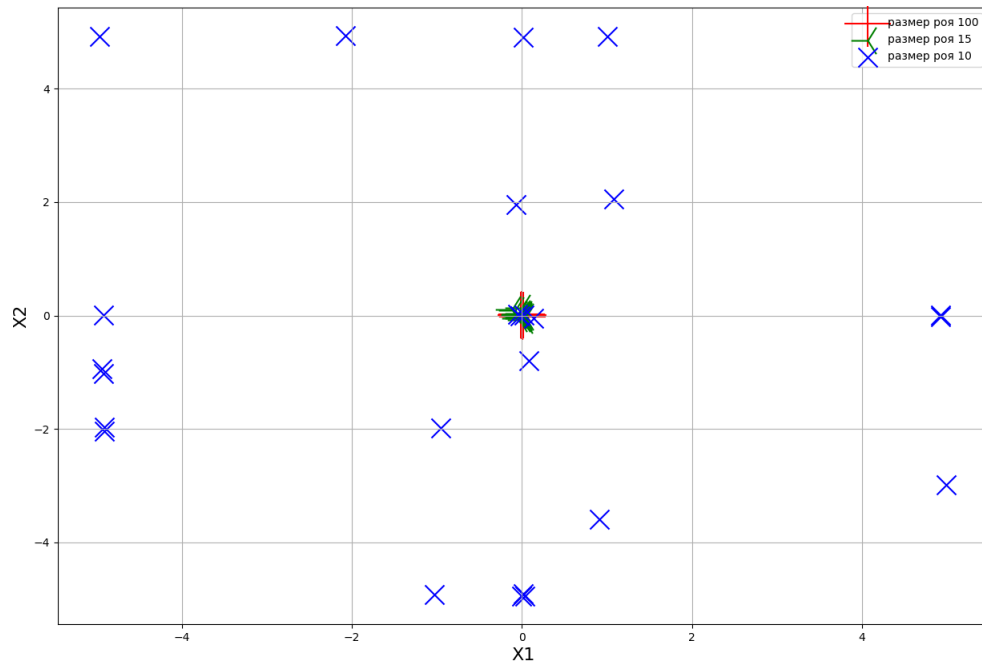


Рис. 4. Найденные роем значения минимума для функции Экли. Время жизни роя 1000

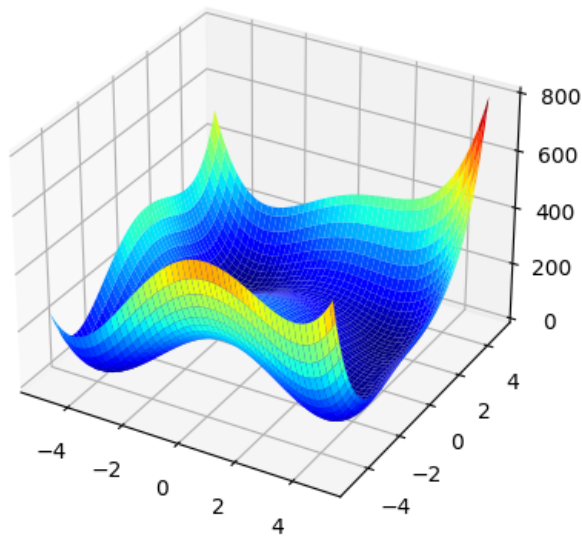


Рис. 5. Функция Химмельброу на промежутке от -5 до 5

$$f(-8.05502; 9.66459) = -19.2085$$

$$f(8.05502; -9.66459) = -19.2085$$

$$f(-8.05502; -9.66459) = -19.2085.$$

Значение гиперпараметров роевого алгоритма оставим неизменным по сравнению с предыдущим экспериментом. Оценим, как рой размером 100, 15, 10 справится с поиском точки минимума. В правом столбце в данном случае будет погрешность, вычисленная по формуле:

$$\Delta = |f(x) - f(x_r)|, \quad (13)$$

где $f(x)$ — минимальное значение функции Хольдера, а $f(x_r)$ — значение функции Хольдера в точке, которую указал рой.

Таблица 8

Результаты эксперимента при размере роя 100 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
2.992	2.014	0.004	2.998	2.002	0.0002
3.006	2.009	0.004	3.0	2.01	0.001
-2.794	3.105	0.031	3.004	1.997	0.0005
2.988	2.014	0.005	3.584	-1.856	0.0009
2.986	2.004	0.007	3.009	1.973	0.010
-2.799	3.124	0.003	2.996	2.018	0.005
2.993	2.010	0.002	3.018	1.973	0.015
3.014	1.974	0.012	-3.796	-3.278	0.017
3.584	-1.829	0.006	3.0	2.001	0.000019
-2.806	3.138	0.002	3.586	-1.846	0.0002
3.574	-1.841	0.005	2.995	2.003	0.0007
3.584	-1.842	0.0006	-2.776	3.099	0.0687
3.003	1.999	0.0002			

Таблица 9

Результаты экспериментов при размере роя 15 и 10 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
Размер роя 15			Размер роя 10		
3.485	-1.755	0.557	3.3256	1.630	3.890
3.572	-1.852	0.008	3.065	1.891	0.212
3.001	1.979	0.007	-2.833	3.143	0.032
3.016	1.935	0.059	-2.788	3.245	0.553
3.054	1.962	0.091	-3.209	3.381	8.668
3.521	-1.815	0.208	-3.088	2.142	30.678
3.536	-1.831	0.119	3.428	-1.717	1.327
-3.785	-3.319	0.052	3.009	2.003	0.004
-2.778	3.147	0.033	-2.793	3.132	0.005
-2.805	3.141	0.004	-3.767	-3.28	0.008
3.057	1.891	0.191	-2.81	3.152	0.018
2.96	2.088	0.124	3.566	-1.762	0.112
3.034	2.075	0.194	-2.821	3.106	0.033
3.263	1.316	4.95	3.477	1.227	9.453
3.027	2.025	0.050	3.594	-1.867	0.009
-2.789	3.123	0.011	-3.784	-3.177	0.497
-2.845	3.117	0.061	-2.751	3.103	0.123
-2.906	3.155	0.364	-4.285	-4.178	48.169
-2.775	3.136	0.03	3.672	-1.946	0.504
3.0102	1.974	0.01	-2.741	3.145	0.139
2.972	2.015	0.024	-2.37	3.791	27.536
3.597	-1.835	0.013	-2.825	3.149	0.0247
3.506	-1.74	0.416	-2.748	3.153	0.125
3.016	1.966	0.019	-2.833	3.133	0.026
-2.826	3.154	0.034	3.552	-1.815	0.061

Ниже представлена таблица 10 с результатами серии вычислений.

Значения X1 и X2 из таблицы 10 представлены на графике на рис. 8.

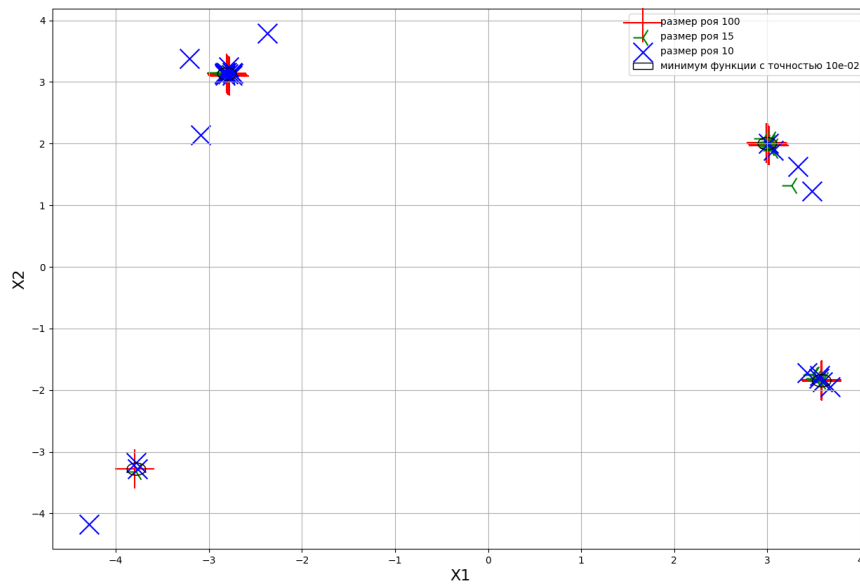


Рис. 6. Найденные роем значения минимума для функции Химмельброу. Время жизни роя 1000

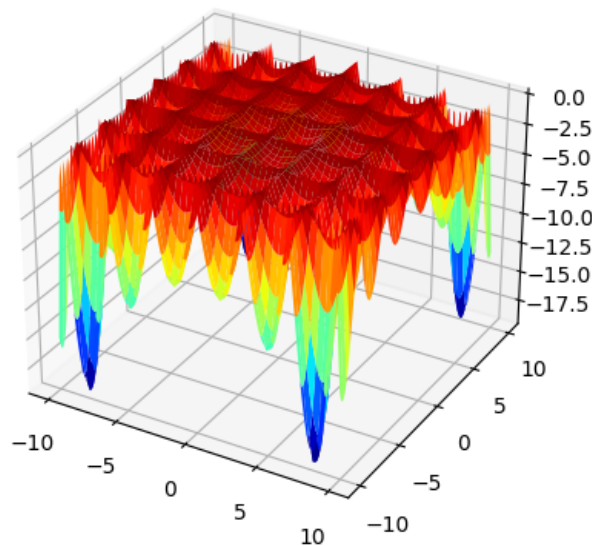


Рис. 7. График функции Хольдера на промежутке от -10 до 10

По графику можно отметить, что не нашедшие точку минимума функции рои остановились в локальных минимумах. Как видно из проведенной серии вычислений, при размере роя 10 алгоритм не смог найти точку минимума функции, но при размере 15 алгоритм справился с поставленной задачей. На основании этого можно сделать вывод, что данный алгоритм применим для решения задач такого класса.

Заключение

Роевые алгоритмы — относительно новое направление в решении задач оптимизации, и вопрос о возможности их применения, и доказательная база сходимости для большого спектра задач до сих пор остаются открытыми. Проведя серию вычислений и проанализировав результаты, можно сделать вывод, что роевые алгоритмы позволяют найти глобальный экстремум даже достаточно сложных функций, имеющих множество точек экстремума или имеющих значительное количество локальных экстремумов.

Таблица 10

Результаты экспериментов при размере роя 100, 15 и 10 и времени жизни 1000 шагов

Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)	Значение X1	Значение X2	Значение функции F(X)
Размер роя 100			Размер роя 15		
-8.051	9.661	-19.208	-8.196	3.293	-5.6995
-8.044	-9.639	-19.2006	-4.877	9.71	-11.0661
8.054	-9.655	-19.2075	4.903	9.668	-11.0498
-8.052	9.671	-19.2079	1.59	9.724	-8.09081
-8.044	-9.679	-19.2052	-8.090	-6.396	-9.4713
-8.067	-9.648	-19.2042	8.090	-6.45	-9.5001
8.06	-9.662	-19.2081	4.84	-9.693	-11.0681
8.042	9.664	-19.2068	8.072	9.753	-19.1255
8.063	9.656	-19.2072	7.99	-9.617	-19.1433
8.061	-9.682	-19.2051	-4.946	9.703	-11.0224
8.053	9.642	-19.2034	4.93	6.551	-4.7095
-8.061	-9.67	-19.2077	-8.048	-9.67	-19.2077
8.055	-9.672	-19.208	8.019	9.66	-19.1952
-8.058	9.685	-19.2042	8.073	9.658	-19.205
8.057	9.692	-19.20058	4.836	9.681	-11.0652
8.058	-9.657	-19.2078	-8.044	-9.638	-19.2005
8.050	-9.654	-19.2072	8.073	9.716	-19.1781
-4.841	-9.701	-11.0686	-8.241	3.321	-5.6695
-8.073	-9.649	-19.2029	-8.03	9.652	-19.2007
-8.044	-9.662	-19.2073	7.936	9.583	-19.0031
-8.092	9.635	-19.1864	4.942	3.297	-2.3451
8.071	9.681	-19.2034	-8.076	9.669	-19.2041
8.063	-9.676	-19.2066	-8.146	9.575	-19.0486
-8.055	9.68	-19.2063	-4.937	9.777	-10.9961
-4.837	-9.734	-11.0621	-8.167	-3.289	-5.7076
Размер роя 10					
9.981	-5.987	-7.547	8.079	6.416	-9.4835
9.984	9.761	-15.6797	1.538	-9.673	-8.0527
8.042	6.338	-9.3932	1.655	-9.764	-8.0852
4.961	3.344	-2.3455	-8.174	-6.526	-9.4641
-4.816	9.726	-11.0584	-9.985	-0.646	-3.7722
9.954	-9.934	-14.2653	8.210	6.492	-9.4393
-1.61	9.74	-8.0939	8.013	-6.593	-9.4079
1.606	9.73	-8.0939	-8.116	-6.436	-9.4939
-4.838	-9.695	-11.0678	2.021	7.303	-1.9344
-1.836	-0.107	-1.4527	4.98	0.024	-1.731
-9.966	9.517	-15.1618	9.997	-9.981	-15.1753
-5.7	-8.292	-2.11697	8.237	6.588	-9.3457
4.928	-6.573	-4.7064	14.502		

Однако особенностью применения такого алгоритма является необходимость правильного подбора размера роя, т. к. при слишком маленьком рое он не способен найти точку экстремума, а при слишком большом — алгоритм роя частиц превращается в простой подбор и поиск точки экстремума.

Кроме того, остается неисследованным вопрос о величине таких параметров алгоритма, как коэффициенты инерции, учета индивидуального опыта, учета группового опыта. Данные параметры были установлены экспериментальным путем и не имеют под собой математического обоснования. Как следствие, данная проблема является перспективной и требует детального исследования.

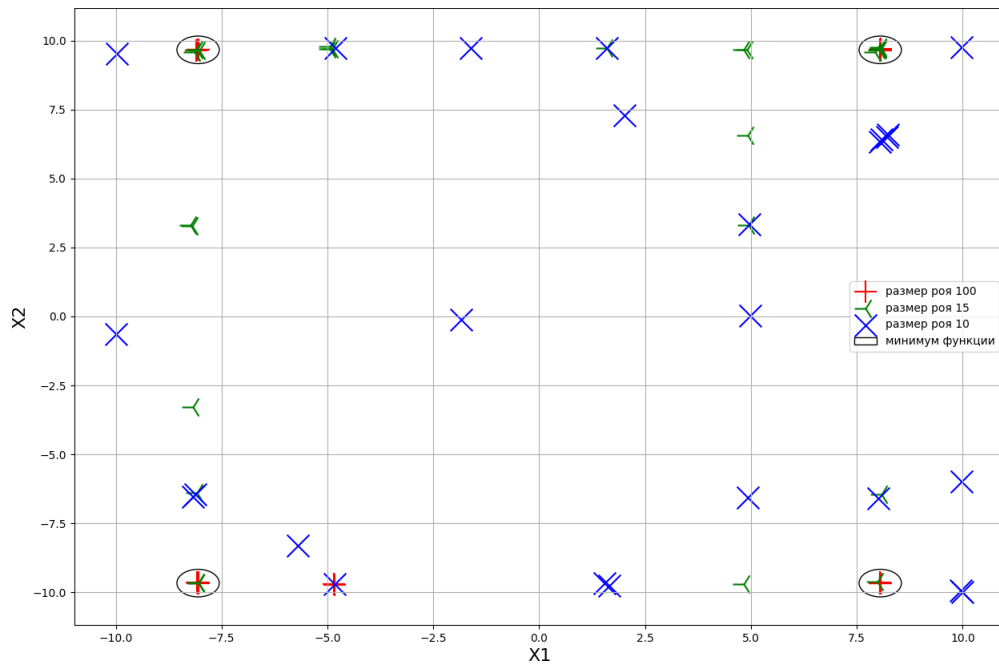


Рис. 8. Найденные роем значения минимума для функции Хольдера. Время жизни роя 1000

ЛИТЕРАТУРА

1. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. *Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*. Tuscany, Italy, June 26–30 (1989). Режим доступа: <http://www-users.york.ac.uk/~jo115/paper-reviews/SwarmIntelligenceinCellularRoboticSystems.pdf>.
2. Зайцев А. А., Курейчик В. В., Полупанов А. А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2010;12. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-evolyutsionnyh-metodov-optimizatsii-na-osnove-roevogo-intellekta>.
3. Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. *Информационные технологии. Приложение*. 2012;7:1–32.
4. Водолазский И. А. и др. Роевой интеллект и его наиболее распространенные методы реализации. *Молодой ученый*. 2017;4(138):147–153.
5. Dazahra M. N., Elmariami F., Belfqih A., Boukherouaa J. Optimal Location of SVC Using Particle Swarm Optimization and Voltage Stability Indexes. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016;6(6):2581–2588.
6. Eberhart R. C., Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. *Congress on Evolutionary Computation*. Seoul, South Korea. 2001;81–86.
7. Poli R. An Analysis of Publications on Particle Swarm Optimisation Applications. *Technical Report CSM-469*. Department of Computer Science, Univ. of Essex, UK. 2007.
8. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation. *Journal of Artificial Evolution and Applications*. 2008;1–10. DOI: 10.1155/2008/685175.
9. Смородинов А. Д., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Применимость алгоритмов роевого интеллекта для решения задач минимизации функции «Экли». *Наука и инновации XXI века : Сборник статей по материалам VIII Всероссийской конференции молодых ученых*. В 4-х томах. Сургут, 23 декабря 2021 года. Сургут: Сургутский государственный университет; 2022. С. 23–27.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-11

ЕДИНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ФОНД ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ КАК БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ. ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РАБОТЫ С НИМ**Л. О. Перетяtko***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных», г. Обнинск, Российская Федерация*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9182-2952>,  peretyatkol@meteo.ru

Аннотация: статья посвящена вопросу рассмотрения данных, содержащихся в Едином государственном фонде данных (ЕГФД) Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), как больших данных (“Big Data”), а также описанию технологий и инструментов для работы с данными ЕГФД. В ЕГФД хранятся данные как на бумажных носителях, так в электронном виде, по гидрометеорологии и смежным с ней областям (метеорологии, аэрологии, гидрологии, океанологии и др.). Особый исследовательский интерес для аналитиков данных и специалистов по обработке данных могут представлять первичные данные в электронном виде. Электронные первичные данные распределены по слоям. В работе представлено обоснование классификации данных ЕГФД как больших данных, также описаны особенности хранящихся в ЕГФД данных. Кроме того, в качестве примера больших данных приведены данные специализированных массивов для климатических исследований, расположенные в открытом доступе, хранимые и пополняемые одним из учреждений Росгидромета — Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»). Приведен перечень предполагаемых для разработки технологий и инструментов для повышения эффективности работы с данными ЕГФД.

Ключевые слова: Госфонд Росгидромета, большие данные, язык описания гидрометеорологических данных, технологии обработки данных, технологии конвертации данных.

Для цитирования: Перетяtko Л. О. Единый государственный фонд гидрометеорологических данных как большие данные. Технологии и инструменты для работы с ним. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):98–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-11.

THE NATIONAL HYDROMETEOROLOGICAL ARCHIVE AS BIG DATA. APPROPRIATE TECHNOLOGIES AND TOOLS**L. O. Peretyatko***All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Center, Obninsk, Russian Federation*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9182-2952>,  peretyatkol@meteo.ru

Abstract: we considered the records of the National Hydrometeorological Archive (NHMA) as Big Data and presented the technologies and tools for processing the NHMA data. The NHMA stores information on hydrometeorology and related areas (meteorology, aerology, hydrology, oceanology, etc.) both on paper and digitally. Digital primary data are of particular interest to data analysts. The data are divided into layers. This paper presents the rationale for considering the USDF records as big data and describes their features. We used the publicly available climate research records stored and replenished by the All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Center as an example of big data. The paper also lists the technologies and tools to be applied for more efficient handling of the NHMA data.

Keywords: Russian National Hydrometeorological Archive, big data, data description language for hydrometeorological data, data processing technologies, data conversion technologies.

Cite this article: Peretyatko L. O. The National Hydrometeorological Archive as Big Data. Appropriate Technologies and Tools. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):98–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-11.

Введение

Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД) является фондом, в рамках которого обеспечивается долговременное (в том числе и постоянное) хранение государственных информационных ресурсов Росгидромета и обслуживание потребителей. Единицами хранения в ЕГФД являются архивные документы [1], хранящиеся по правилам Росархива, и динамически изменяемые электронные массивы данных наблюдений (синтаксически и семантически обработанных первичных данных). Головной организацией, осуществляющей ведение ЕГФД, является Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», далее ВНИИГМИ-МЦД).

Согласно постановлению Правительства РФ от 21.12.1999 № 1410 ЕГФД представляет собой упорядоченную, постоянно пополняемую совокупность документированной информации о состоянии окружающей среды, ее загрязнении, получаемой в результате работы наблюдательной сети Росгидромета, а также информацию общего назначения и специализированную информацию в области гидрометеорологии и смежных с ней областях [2]. Данные в ЕГФД хранятся на фото- и бумажных носителях, а также в электронном виде на магнитных лентах и жестких дисках.

Данные первичных наблюдений являются уникальными и наиболее ценными для использования. По этой причине в ЕГФД данные первичных наблюдений хранятся в электронном виде с разной степенью обработки и организации [3]. Электронные первичные данные подразделяются на следующие виды: оперативные (используются для формирования оперативных прогнозов), режимные (полные данные наблюдений, обрабатываются с задержкой, используются для формирования режимно-справочных банков данных) и исторические (хранятся в неизменном виде, представляют собой непрерывные временные ряды данных по точке наблюдения). Данные первичных наблюдений являются уникальными и наиболее ценными.

В ЕГФД выполняется многослойное хранение электронных данных первичных наблюдений, поскольку, во-первых, необходимо хранить исходные данные первичных наблюдений, во-вторых этапы формирования данных повышенной достоверности подразумевают изменение исходных данных первичных наблюдений, получаемых из наблюдательной сети.

В первом слое находятся первичные данные в электронном виде, полученные с пунктов наблюдения. Данные этого слоя проходят минимальную обработку и хранятся в исходном виде, т. е. в виде, максимально приближенном к виду данных, получаемых из системы наблюдения, которые описываются иерархической моделью данных.

Во втором слое находятся электронные данные, полученные в результате синтаксической обработки и проверки на полноту исходных данных. Также в этом слое данных хранятся нормализованные архивы исходных данных, представленных в виде рядов наблюдений по точке наблюдения, и сгруппированные в режимно-справочные банки данных (РСБД) по видам наблюдений, выстроенных по точке наблюдения.

Технологии создания третьего слоя данных повышенной достоверности находятся в разработке. Этот слой данных будет формироваться на основе данных второго слоя путем устранения семантических ошибок.

Особенностью хранимых электронных данных в ЕГФД является формат хранения данных — ЯОД (язык описания гидрометеорологических данных). Данный формат позволяет сохранить иерархическую структуру данных, получаемых от сети наблюдения Росгидромета. Детальное описание формата представлено в статье [4].

Данные ЕГФД — это большие данные (“Big Data”)

В книге «Большие данные: Новый рубеж в производительности, инновациях и конкурентной борьбе» Джеймс Маньика совместно с соавторами дает следующее определение большим данным: «Большие данные относятся к наборам данных, размер которых превышает возможности обычных программных средств для сбора, хранения, управления и анализа баз данных» [5].

В качестве определяющих характеристик больших данных традиционно выделяют «три V»: *volume* — физический объем, *velocity* — скорость прироста, *variety* — разнообразие.

Изначально «три V» были выработаны в 2001 году вне контекста представлений о больших данных. В дальнейшем возникли различные интерпретации признака «трех V». Кроме того, появились

расширения изначальных признаков:

- «четыре V» (*volume, velocity, variety, veracity*) [6] — добавился признак *veracity* — достоверность;
- «пять V» (*volume, velocity, variety, viability, value*) [7] — были добавлены признаки *viability* — жизнеспособность и *value* — ценность;
- «семь V» (*volume, velocity, variety, veracity, value, variability, visualization*) [8] — этот набор признаков является комбинацией признаков «четыре V» и «пять V», где был исключен признак *viability* (*жизнеспособность*) и были добавлены признаки *variability* — переменчивость и *visualization* — визуализация.

Во всех случаях подчеркивается, что физический объем больших данных не является определяющей характеристикой. Важны и другие характеристики, существенные для задач обработки и анализа данных.

Рассмотрим данные ЕГФД с позиции следующих «шести V» признаков:

- *volume* — объем. На 31 декабря 2021 года в ЕГФД хранится информация на электронных носителях, которая записана в роботизированную библиотеку в объеме 2299,23 Гб (включая дубли), а также 2781536 единиц хранения документов на бумажном носителе информации и 865393 единицы хранения документов на фотоносителях [3];
- *velocity* — скорость прироста. Данные ЕГФД, в зависимости от вида информации, пополняются ежемесячно или ежегодно;
- *variety* — разнообразие. Объем информации ЕГФД Росгидромета, хранящейся во ВНИИГМИ-МЦД на электронных носителях, по состоянию на 31 декабря 2021 года по видам информации, без учета информации ИСЗ и зарубежной информации, составляет: метеорологическая информация (34,30 %), морская гидрометеорологическая (22,01 %), аэрологическая (19,36 %), гео- и гелиофизическая (11,83 %). Остальные виды информации составляют менее 5 % от объема фонда каждый [3];
- *veracity* — достоверность. Данные второго слоя ЕГФД проходят синтаксическую верификацию и проверку на полноту, что в совокупности обеспечивает повышенную достоверность этих данных;
- *value* — ценность. Данные ЕГФД представляют исключительную историческую, исследовательскую и практическую ценность для науки и органов власти;
- *viability* — жизнеспособность. Данные ЕГФД являются уникальными историческими данными.

На основе рассмотренных выше признаков и подтверждающей эти признаки информации можно однозначно классифицировать данные, хранящиеся в ЕГФД, как большие данные.

Примером больших данных также являются специализированные массивы для климатологических исследований, созданные на основе первичных электронных данных ЕГФД и выстроенные во временные ряды по точкам наблюдения (метеорологическим станциям). Специализированные массивы находятся в открытом доступе на web-сайте ВНИИГМИ-МЦД, с возможностью получения выборок, предназначены для решения научно-прикладных задач в области исследования климата. Они регулярно пополняются, а обнаруживаемые в них ошибки исправляются [9].

Специализированные массивы составлены по следующим климатическим параметрам [10]:

- средняя месячная температура воздуха на станциях России;
- месячные суммы осадков на станциях России;
- среднемесячное давление воздуха на уровне станции;
- суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния на станциях России;
- среднемесячное парциальное давление водяного пара на станциях России;
- суточная температура воздуха и количество осадков на станциях России и бывшего СССР.

Технологии и инструменты для работы с ЕГФД

Принимая во внимание особенности и специфичность формата хранения электронных данных ЕГФД, для эффективной работы с этими данными (обработки и распределения данных по слоям) предполагается создать следующие технологии и инструменты:

- технология и система формирования и хранения базы данных метаописаний для понимания фактического состояния файлов ЕГФД (полноты, наличия ошибок и их физического/логического расположения);
- технология и система поиска и выборки данных из больших массивов данных ЕГФД;
- комплекс программных средств взаимной конвертации данных в формате ЯОД в современные распространенные форматы (реляционные базы данных, HDF/NetCDF, XML и др.), реализующий тех-

нологию взаимной конвертации данных различной структуры, а также содержащий методы проверки адекватности выполненной конвертации, с поддержкой различных систем управления реляционными базами данных (СУБД), например, таких как PostgreSQL, MySQL, SQLite, Microsoft SQL Server. Первая версия системы взаимной конвертации описана в соответствующей статье [11];

- технология сокращения времени подготовки (преобразования) данных ЕГФД с использованием параллельных вычислений;
- технология формирования третьего слоя данных наблюдений повышенной достоверности;
- комплекс программных средств формирования третьего слоя данных повышенной достоверности, реализующий технологию формирования третьего слоя данных, включающий в себя систему формирования заявок от потребителей на исправление данных, с рассмотрением каждой заявки экспертами, определяющими обоснованность внесения изменений;
- модернизация инструментов составления режимно-справочных банков данных (второго слоя данных), а также пополнения специализированных массивов данных для климатологических исследований ЕГФД.

Перечисленные технологии и инструменты в данный момент находятся на разных стадиях разработки. Последующие статьи будут посвящены каждому разрабатываемому инструментальному средству в отдельности, а также их составляющим.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 52.19.143 –2019 Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении. Режим доступа: <http://meteo.ru/egfd/145-metodical>.
2. Постановление Правительства РФ от 21.12.1999 № 1410 «О создании и ведении Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей природной среды, ее загрязнении». Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/services/gosuslugi/29/doclist29/142/11985/>.
3. Ведение ЕГФД, архивация данных, обслуживание данными и информацией ЕГФД. Сведения о составе Госфонда Росгидромета. Режим доступа: <http://meteo.ru/egfd/142-about-egfd>.
4. Кофтан Ю. Р., Перетягко Л. О. К построению технологии взаимной конвертации баз данных различной структуры для пополнения и верификации данных ЕГФД, а также для обслуживания потребителей. *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2018;181:162–174.
5. Manyika J. et al. *Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity*. McKinsey Global Institute; 2011.
6. Alba Diaz. *The Four V's of Big Data*. Режим доступа: <https://opensistemas.com/en/the-four-vs-of-big-data>.
7. Niel Biehn. *The Missing V's in Big Data: Viability and Value*. Режим доступа: <https://www.wired.com/insights/2013/05/the-missing-vs-in-big-data-viability-and-value/>.
8. Eileen McNulty. *Understanding Big Data: the Seven V's*. Режим доступа: <https://dataconomy.com/2014/05/seven-vs-big-data>.
9. Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований. *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2014;177:136–148.
10. *Специализированные массивы*. Режим доступа: <http://meteo.ru/data>.
11. Перетягко Л. О., Кофтан Ю. Р. Система взаимной конвертации данных различной структуры для обслуживания потребителей ЕГФД. *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2020;186:163–175.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-12

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ИНВАРИАНТ В БИОКИБЕРНЕТИКЕ С ПОЗИЦИЙ СТАТИСТИКИ**Г. В. Газя¹, Н. Ф. Газя², В. М. Еськов³**¹ Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация,
✉ safety.ot86@gmail.com² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация³ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г.
Сургут, Российская Федерация

Аннотация: идентификация стационарных режимов (неизменности) биосистем в биокibernетике приобрела критическое значение после открытия эффекта Еськова–Зинченко. В этом эффекте доказано отсутствие статистической устойчивости любой выборки любого параметра функций организма человека. Если любая выборка статистически уникальна, то статистика не работает и нет тогда способов наблюдать неизменность биосистемы (она находится в непрерывном хаотичном движении). В работе предлагается рассчитывать числа k пар (в таблицах парных сравнений выборок), которые статистически могут иметь общую генеральную совокупность. Одновременно обращается внимание на то, что площади псевдоаттракторов в двумерных фазовых пространствах состояний тоже могут быть инвариантами (при неизменном физиологическом состоянии биосистемы).

Ключевые слова: хаос, псевдоаттракторы, эффект Еськова–Зинченко, инварианты.

Для цитирования: Газя Г. В., Газя Н. Ф., Еськов В. М. Проблема выбора инвариант в биокibernетике с позиций статистики. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):102–109. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-12.

STATISTICAL SELECTION OF INVARIANTS IN BIOCIBERNETICS**G. V. Gazya¹, N. F. Gazya², V. M. Eskov³**¹ Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation, ✉ safety.ot86@gmail.com² Surgut State University, Surgut, Russian Federation³ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation

Abstract: the study of steady-state modes (invariability) in biosystems through biocybernetics research is paramount in the light of the Eskov–Zinchenko effect. The effect is statistical instability of any human body property. If any sample has unique statistical properties, then the statistical approach does not work and we cannot observe the invariability of the biosystem (it is in a continuous, chaotic movement). This work proposes to estimate k pairs of numbers (using pairwise comparisons of the samples), which statistically may have a general distribution. It is also emphasized that the areas of pseudoattractors in the two-dimensional phase state spaces can also be invariants (for an unchanged physiological state of the biosystem).

Keywords: chaos, pseudoattractors, Eskov–Zinchenko effect, invariants.

Cite this article: Gazya G. V., Gazya N. F., Eskov V. M. Statistical Selection of Invariants in Biocybernetics. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):102–109. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-12.

Введение

Нобелевский лауреат I. R. Prigogine в 1988 году предложил отказаться от любых детерминистских моделей (в рамках теории динамических систем — ТДС) при описании любой биосистемы [1]. Задолго до этого W. Weaver (в 1948 г.) вообще предложил отказаться от стохастики в описании систем третьего типа — СТТ (биосистем) [2].

Однако только 20 лет назад был доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЭЗ), в котором наблюдается отсутствие статистической устойчивости любых выборок любых параметров функций организма

человека. Любая выборка любого параметра $x_1(t)$ будет уникальной [3–11]. Тогда стохастика уже неприменима.

Поскольку ЭЭЗ имеет всеобщий характер (для всех биосистем — функций организма человека), то возникают серьезные проблемы с выбором инвариант для описания стационарных режимов (СР) работы организма человека. Уникальность выборок не обеспечивает регистрацию СР, и тогда возникает полная неопределенность в биокибернетике [9–19].

В статье рассматривается проблема статистической устойчивости чисел k в матрицах парных сравнений выборок и выборок площадей псевдоаттракторов (ПА) в двумерном фазовом пространстве состояний (ФПС) вектора состояния работы сердца $x=(x_1, x_2)^T$. Здесь $x_1(t)$ — величина кардиоинтервалов (КИ), а $x_2(t)$ — величина скорости изменения $x_1(t)$. В таком ФПС анализируются фазовые портреты КИ, находятся их площади S и координаты центров ПА.

Проблема выбора инвариант в современной науке

В биомедицине существует весьма важное понятие «гомеостаз», которое постулирует постоянство внутренней среды организма человека. Ю. В. Наточин в 2017 году представил обширную публикацию, в которой он невольно продемонстрировал три основных подхода в понимании гомеостаза [16].

Во-первых, он пишет о неизменности параметров гомеостаза, и тогда (с позиции статистики) мы должны говорить о точке $x(t)$ в ФПС. Напомним, что гомеостаз, как и любую функцию организма человека, можно описывать вектором состояния $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном ФПС. При неизменности (статике гомеостаза) этот $x(t)=\text{const}$. Такое значение никто и никогда не регистрировал для биосистем [20–28].

Далее Ю. В. Наточин говорит о вероятностном подходе, где нужны повторные регистрации процесса, и мы тогда работаем с выборками $x_i(t)$. Однако в конце этих регистраций академик Наточин обращает внимание на вариации $x_i(t)$, т. е. он подходит к ЭЭЗ.

В разрабатываемой сейчас нами теории хаоса-самоорганизации (ТХС) основное внимание уделяется вариационным размахам $\Delta x_i(t)$. На основе этих $\Delta x_i(t)$ мы строим псевдоаттракторы (ПА), рассчитываем площади этих ПА и находим координаты их центров в виде $x_i^o(t)$ [13–22]. При этом мы говорим об особом хаосе параметров $x_i(t)$ биосистем, который не имеет никакого отношения к динамическому хаосу Лоренца.

Напомним, что 5 нобелевских лауреатов (A. V. Hill, I. R. Prigogine, M. Gell-Mann, В. Л. Гинзбург, R. Penrose) надеялись на динамичный хаос (ДХ) Лоренца, но за последние 20 лет мы доказали отсутствие ДХ у биосистем. СТТ не могут демонстрировать ДХ, т. к. ЭЭЗ показывает отсутствие инвариант внутри аттрактора Лоренца [3–9]. СТТ показывает особый статистический хаос.

Именно о вариационных размахах пытался сказать академик Ю. В. Наточин [16], но при этом он базировался на методах детерминистской и стохастической науки (ДСН) в описании гомеостаза и биосистем в целом. Напомним, что в ДСН имеются строгие требования к стационарным режимам (СР) любой системы и к неизменности системы.

В рамках детерминизма (в ТДС) мы обычно имеем дело с вектором состояния системы $x=x(t)$ в m -мерном ФПС. Тогда СР описывается уравнением $dx/dt=0$ и любая $x_i(t)=\text{const}$. Это очень строгое требование, и для биосистем оно почти неприменимо [3–11, 25–30].

Обычно для биосистем (в моделях биологии и медицины) говорят о неизменности, если не изменяются статистические функции распределения выборок x_i . При этом находят первую выборку $x_1(t)$ на интервале Δt_1 и вторую выборку $x_1(t)$ на интервале Δt_2 .

Если статистические функции распределения $f(x)$ на интервалах не изменяются, то считается, что биосистема неизменна. При этом никто и никогда не задавал вопрос о том, что было до интервала Δf_1 , между интервалами Δt_1 и Δt_2 и после интервала Δt_2 .

А в стохастике считалось, что $f(x)$ сохраняется на достаточно длительном интервале (периоде наблюдения) T , который включает в себя и Δt_1 , и Δt_2 , и многие другие интервалы времени Δt_i . Очень странно, но никто за последние 200 лет никогда не сравнивал выборки, которые были получены на соседних интервалах Δt_1 и Δt_2 [4–9].

Более того, никто не повторял такие парные измерения по 100 раз и не задавал вопрос: какова частота совпадения двух соседних выборок при повторных измерениях (по 100 раз подряд). Могут ли вообще две соседние выборки совпадать и с какой частотой?

Этот вопрос мы задали себе 20 лет назад и убедились, что треморограммы (ТМГ), две соседние, совпадают с частотой $p_{i,i+1}^* \leq 0,05$. Для теппинграмм (ТПГ), кардиоинтервалов (КИ) и электромиограмм такая частота совпадений $p_{i,i+1}^* \leq 0,2$ (и менее). И только электроэнцефалограммы (ЭЭГ) совпадают с частотой $p_{i,i+1}^* \leq 0,35$.

ЭЭГ дают самую высокую частоту совпадения выборок, но обычно такая частота совпадения невелика. Мы провели десятки тысяч разных измерений с ТМГ, ТПГ, ЭМГ, КИ, ЭЭГ и везде доказали уникальность любой выборки любого параметра организма человека [3–9, 22–30]. Это доказывает уникальность выборок параметров организма.

Сейчас это получило название эффекта Еськова–Зинченко (ЭЕЗ), и этот ЭЕЗ доказывает уникальность любой выборки любого параметра $x_i(t)$ любой функции организма человека. Все это ставит под вопрос дальнейшее использование ДСН в биомедицине, психологии и других науках о живых системах. Уникальность выборки $x_i(t)$ делает невозможным прогноз будущего состояния биосистемы [25–30].

Без прогноза будущего современная ДСН не может работать. В этом случае любая модель биосистемы (в рамках ТДС или стохастики) имеет исторический характер, она описывает прошлое биосистемы. Тогда мы должны отказаться от ДСН в описании биосистем. Именно это и пытался сказать W. Weaver в 1948 году [2], но никто на это не отреагировал.

Все эти 70 лет всех устраивала статистика в описании биосистем (систем третьего типа (СТТ) в представлениях Weaver [2]). Однако уникальные системы — это не объект ДСН, и об этом честно говорил нобелевский лауреат R. Penrose в своей монографии. Нет повторений $f(x)$ и их статистических характеристик — нет и прогноза будущего. Weaver прямо указывал, что СТТ не могут быть объектами ДСН, но его все игнорировали эти последние 70 лет (кроме нас).

Обычно мы подряд регистрируем 15 выборок одного параметра $x_i(t)$ у одного испытуемого и затем строим матрицу парных сравнений всех этих 15-ти выборок. При этом изучаются все возможности парного сравнения путем анализа критерия Вилкоксона p_{ij} ($i \neq j$).

Очевидно, что если для i -й и j -й выборки критерии $p_{ij} \geq 0,05$, то данная пара выборок может иметь общую генеральную совокупность (но не обязательно, с высокой долей вероятности). Для примера мы представляем новую матрицу парных сравнений 15-ти выборок одного и того же испытуемого (см. таблицу 1).

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок кардиоинтервалов (КИ) одного и того же человека (без нагрузки, число повторов регистрации КИ $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (критерий различий $p < 0,05$, число совпадений $k = 10$) [22]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,02	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00		0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,78		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,25	0,04	0,67	0,73	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25		0,02	0,38	0,49	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02		0,08	0,14	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,38	0,08		0,30	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73	0,49	0,14	0,30		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

В таблице 1 мы имеем небольшое число k пар выборок КИ, которые статистически совпадают, т. е. могут иметь общую генеральную совокупность ($p_{ij} \geq 0,05$). Это число K показывает долю стохастики в поведении СТТ. Очевидно, что ЭЕЗ закрывает любые возможности в изучении неизменности (стационарности) любой биосистемы из-за уникальности выборок [3–9].

Тем более, что любая модель в рамках ТДС имеет исторический характер, а точка $x(t_x)$ конечного состояния СТТ не может быть повторима даже в виде выборки таких точек. Если любая выборка уникальна, то это требует создания новой теории и перехода от стохастики к нашей новой теории ТХС [3–9, 20–28].

Очевидно, что как одна (конечная) точка $x(t)$ не может быть повторена и мы регистрируем выборку точек, так и одна выборка таких $x(t_x)$ для СТТ не может быть повторена. Нужно изучать выборки выборок. Поэтому мы и строим матрицы вида таблицы 1.

На сегодня таких матриц для разных параметров СТТ мы построили десятки тысяч. Во всех случаях мы имеем низкие значения чисел K для одного испытуемого. Если брать группу из 15-ти разных испытуемых, то тут ситуация еще хуже. Здесь числа k тоже малы.

При этом ситуация для статистики резко ухудшается. Действительно, если мы можем получать выборки разных испытуемых, которые принадлежат разным генеральным совокупностям, то такая группа будет неоднородной. Это разные люди, и нет причин их объединять в одну, общую группу. С неоднородными группами невозможно работать в статистике [3–9].

Для примера мы приводим таблицу 2, где представлены критерии p_{ij} для 15-ти разных испытуемых. Число k , где $p_{ij} \geq 0,05$, весьма невелико. Подчеркнем, что мы в таких расчетах использовали разные критерии (Манна–Уитни, Колмогорова, Вилкоксона, Краскела–Уоллиса и т. д.) и везде получали одинаковый результат: k было невелико.

Таблица 2

Матрица парного сравнения 15-ти выборок кардиоинтервалов (КИ) группы девушек (без нагрузки), использовался критерий Ньюмана–Кейлса (значимость $< 0,05$, число совпадений $kg = 15$) [22]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,57	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00		0,62	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
0,00	0,62		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,38	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
0,57	0,00	0,00	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	0,00	1,00		0,00	0,09	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
0,00	1,00	1,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
0,00	0,70	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03		0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		1,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00		0,00	
0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

Отсутствие однородности любой группы (в виде ЭЭЗ) полностью завершает дальнейшее использование статистики в описании биосистем. В итоге мы не можем работать с выборкой одного человека (она уникальна) и не можем работать с любой группой (выборки не принадлежат одной генеральной совокупности).

Все это полностью завершает дальнейшее использование ДСН в изучении СТТ и требует новой теории (ТХС). Именно об этом и говорил W. Weaver в 1948 году. Сейчас мы не можем сравнивать состояния отдельного человека и тем более целой группы. Выборки непрерывно и хаотично изменяются, параметры выборок не инвариантны [3–9].

Возникает фундаментальная проблема: как оценивать покой (СР) или изменения СТТ (любой биосистемы)? Что можно брать за инварианты в оценке покоя или изменений СТТ? Напомним, что в странном аттракторе Лоренца (при ДХ) мы имеем инвариантность мер, а в ЭЭЗ этого нет [3–9, 20–30].

Возможные инварианты в рамках стохастики

Во многих наших публикациях [3–15, 22–30] мы доказываем, что статистика не работает. Можно ли все-таки как-то использовать методы статистики для расчета инвариантов? Напомним, что в новой науке (теории хаоса-самоорганизации — ТХС) мы работаем с выборками выборок [22–30].

Для этого мы строим матрицы парных сравнений многих выборок, что представлено в таблице 1 и таблице 2. Закономерно поставить вопрос: какую информацию нам дают числа k в таких таблицах?

Для изучения этого вопроса мы провели серии экспериментов с многократными повторениями регистраций выборок кардиоинтервалов (КИ) у одного и того же человека. В этих экспериментах было 2 группы (по 15 женщин и 15 мужчин). У каждого испытуемого мы регистрировали по 225 выборок КИ. Каждая такая выборка была не менее 5 минут регистрации и содержала не менее 300 КИ.

Для каждого испытуемого мы строили 15 матриц (подобных таблице 1 каждая) и рассчитывали 15 чисел k (для этих 15-ти матриц). В итоге была получена выборка из 15 чисел k для каждого испытуемого. Для всех 15-ти женщин мы получили 15 выборок чисел k (для каждого испытуемого одна выборка).

Значения этих чисел k для всех 15-ти женщин мы приводим в таблице 3. Здесь представлено 15 столбцов — значений чисел k .

Таблица 3

Матрица парных сравнений выборок чисел k для 15-ти разных испытуемых, представленных критерием Ньюмана–Кейлса для каждой i -й и j -й выборок k пары сравнений (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_k = 98$) [22]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	1,00	1,00
	1,00		1,00	0,74	0,00	0,16	0,04	0,01	0,08	0,02	1,00	0,30	0,00	0,23	0,00
0,00	1,00	1,00		1,00	0,41	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	1,00	0,63
0,00	1,00	0,74	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,51	1,00	1,00
0,00	1,00	0,00	0,41	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,57	1,00	0,16	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,00	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	0,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,00	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	0,20	1,00	1,00
1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
0,00	0,23	0,00	0,01	0,51	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00		1,00	1,00
0,00	1,00	0,23	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
0,00	1,00	0,00	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	1,00	1,00

В итоге, имея 15 выборок чисел k для этой группы, мы рассчитали матрицу парных сравнений выборки k как для выборок k (см. таблицу 4).

Таблица 4 позволяет нам сравнить выборки чисел k для всех 15-ти испытуемых. Очевидно, что такая матрица дает нам числа k_k пар выборок чисел k , которые (такие две выборки чисел k для двух сравниваемых человек) могут иметь одну (общую) генеральную совокупность.

Как видно из таблицы 4, число k_k велико и приближается к требуемой статистикой величине (с $p_{ij} \geq 0,05$) $k \geq 95\%$. Это доказывает, что выборки чисел k различаются несущественно. В итоге можно сделать два базовых вывода.

Во-первых, числа k сильно не различаются и могут быть инвариантны в оценке спокойного функционального состояния группы женщин (одинакового возраста, длительно проживающих в одинаковых экологических условиях).

Во-вторых, совпадение чисел k этих 15-ти женщин может доказывать наличие однородности группы. Эти женщины, действительно, по матрицам парных сравнений выборок (по числам k) могут совпадать. Их объединение в одну общую (однородную) группу вполне правомерно.

Подчеркнем, что с позиции статистики выборки каждой женщины (между собой) статистически не совпадают (везде будет таблица 1 в виде ЭЭЗ). С другой стороны, выборки чисел k статистически совпадают (с большой долей вероятности) и это может быть критерием однородности группы.

Представленные данные в этой статье доказывают возможность расчета чисел k в виде некото-

Таблица 4

Результаты сравнения пар выборок (k) для всех 15-ти матриц парного сравнения параметров КИ у группы из 15-ти испытуемых при повторных экспериментах [22]

№ п/п	Значения k у 15-ти испытуемых														
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}
1	15	12	9	6	14	12	14	11	17	15	10	12	26	14	13
2	9	8	12	11	6	22	13	14	18	9	13	7	20	9	13
3	10	4	13	14	17	19	16	13	11	10	11	9	12	21	14
4	5	6	11	9	17	10	11	16	15	22	11	10	15	10	12
5	19	13	13	12	16	11	10	14	12	20	15	8	15	10	12
6	10	6	14	13	11	11	12	13	10	12	15	15	18	12	12
7	10	9	9	13	21	29	16	14	11	20	14	14	15	12	14
8	11	31	10	15	11	13	13	14	13	19	12	6	16	10	18
9	16	7	13	12	18	9	14	11	14	11	7	17	13	14	15
10	8	4	9	15	25	12	12	13	14	10	11	17	14	12	17
11	16	6	10	12	12	17	12	17	12	7	13	16	19	20	19
12	20	6	12	14	14	8	13	16	14	12	10	11	15	13	14
13	10	4	14	15	18	12	16	14	13	15	11	38	14	16	13
14	6	9	12	13	11	13	15	17	9	14	13	11	17	14	16
15	17	4	10	10	20	14	14	11	16	18	15	18	15	12	15
$\langle k \rangle$	12	9	11	12	15	14	13	14	13	14	12	14	16	13	15
$\sigma, \pm$	4,7	6,8	1,8	2,5	4,8	5,6	1,8	2,0	2,5	4,6	2,3	7,7	3,5	3,5	2,2

рых инвариант. Подчеркнем, что и по другой группе (из 15-ти мужчин) мы получили приблизительно такой же результат.

Заключение

После доказательства эффекта Еськова–Зинченко (ЭЭЗ) становится понятно, что любая выборка статистически уникальна, ее очень сложно повторить два раза. Более того, группы разных испытуемых статистически не совпадают.

Таблица 2 показывает, что очень мало пар сравнения выборок КИ, которые могут иметь одну (общую) генеральную совокупность. Любая группа неоднородна, и с ней статистика не работает! Нужны новые методы и новая теория для роста новых инвариант. Такие новые инварианты должны сохраняться в неизменном физиологическом состоянии организма человека.

Одновременно такие новые инварианты должны сохраняться и в однородной группе. Сейчас мы в рамках новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) предлагаем строить фазовые пространства для вектора состояния биосистемы $x=(x_1, x_2)^T$. Здесь $x_1(t)$ — реально измеримая величина, а $x_2(t)$ — скорость изменения этой $x_1(t)$.

На фазовой плоскости этого вектора $x(t)$ находится площадь прямоугольника, внутри которого помещается фазовый портрет данной биосистемы. Оказалось, что эти площади S (площади псевдоаттрактора) могут статистически сохраняться, если биосистема функционально не изменяется (находится в физиологическом покое).

Поскольку данный подход выходит за рамки стохастики (используются методы новой ТХС), то остальное рассмотрение выбора таких инвариант (в виде площади S) мы представим в другом сообщении. Очевидно, что вся биомедицина крайне нуждается в создании и обосновании новых инвариант.

Эти новые инварианты должны статистически сохраняться, если с биосистемой ничего существенного не происходит. Наоборот, если СТТ изменяется, то и инварианты должны существенно изменяться. Очевидно, что расчет чисел k (в матрицах типа таблицы 1) — весьма громоздкая процедура. Нужны более удобные и легко вычисляемые величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prigogine I. R. The Philosophy of Instability. *Futures*. 1989;396–400.
2. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36(4):536–544.
3. Eskov V. M., Filatova O. E. Problem of Identity of Functional States of Neuronal Systems. *Biofizika*. 2003;48(3):526–534.
4. Eskov V. M. Automatic Identification of Differential Equations Simulating the Behavior of Neuron Circuits. *Measurement Techniques*. 1994;37(3):359–364. DOI: 10.1007/BF02614280.
5. Еськов В. В. *Математическое моделирование гомеостаза и эволюции complexity: монография*. Тула: Изд-во ТулГУ; 2016. 307 с.
6. Еськов В. В., Пятин В. Ф., Филатова Д. Ю., Башкатова Ю. В. *Хаос параметров гомеостаза сердечно-сосудистой системы человека*. Самара: ООО «Порто-Принт»; 2018. 312 с.
7. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Complexity: хаос гомеостатических систем* / Под ред. Г. С. Розенберга. Самара: ООО «Порто-Принт»; 2017. 388 с.
8. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Конец определенности: хаос гомеостатических систем* / Под ред. А. А. Хадарцева, Г. С. Розенберга. Тула: Тульское производственное полиграфическое объединение; 2017. 596 с.
9. Vokhmina Y. V., Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Filatova O. E. Measuring Order Parameters Based on Neural Network Technologies. *Measurement Techniques*. 2015;58(4):462–466. DOI: 10.1007/S11018-015-0735-X.
10. Filatova O. E. Measurement and Control Facilities for Investigating Neuron Systems. *Measurement Techniques*. 1998;41(3):229–232. DOI: 10.1007/BF02503888.
11. Filatova O. E. Standardizing Measurements of the Parameters of Mathematical Models of Neural Networks. *Measurement Techniques*. 1997;40(1):55–59. DOI: 10.1007/BF02505166.
12. Башкатова Ю. В., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Состояние сердечно-сосудистой системы спортсменов при нагрузке на Севере Российской Федерации. *Экология человека*. 2020;6:41–45. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-6-41-45.
13. Grigorenko V. V., Nazina N. B., Filatov M. A., Chempalova L. S., Tretyakov S. A. New Information Technologies in the Estimation of the Third Type Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032003.
14. Филатов М. А., Иляшенко Л. К., Колосова А. И., Макеева С. В. Стохастический и хаотический анализ параметров внимания учащихся разных экологических зон. *Экология человека*. 2019;7:11–16. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-7-11-16.
15. Filatov M. A., Poluhin V. V., Shakirova L. S. Identifying Objective Differences Between Voluntary and Involuntary Motion in Biomechanics. *Human. Sport. Medicine*. 2021;21(1):145–149. DOI: 10.14529/hsm210118.
16. Наточин Ю. В. Гомеостаз. *Успехи физиологических наук*. 2017;48(4):3–15.
17. Khadartsev A. A., Eskov V. V., Pyatin V. F., Filatov M. A. The Use of Tremorography for the Assessment of Motor Functions. *Biomedical Engineering*. 2021;54(6):388–392.
18. Kolosova A. I., Filatov M. A., Maistrenko E. V., Ilyashenko L. K. An Analysis of the Attention Indices in Students from Surgut and Samara Oblast from the Standpoint of Stochastics and Chaos. *Biophysics*. 2019;64(4):827–832. DOI: 10.1134/S0006302919040240.
19. Козлова В. В., Галкин В. А., Филатов М. А., Еськов В. М. Моделирование нейросетей мозга с позиций гипотезы W. Weaver. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:59–68. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-52-59.
20. Филатова О. Е., Галкин В. А., Башкатова Ю. В., Шакирова Л. С. Новые возможности нейрокомпьютеров в биомедицине. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;3:5–16. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-5-14.
21. Еськов В. В., Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Юшкевич Д. П., Поросинин О. И. Моделирование неопределенностей в рамках компартментно-кластерной теории. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;4:85–94. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-61-72.
22. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Чempалова Л. С., Шамов К. А., Кухарева А. Существуют ли возможности для исследования стохастики в кардиологии и во всей медицине? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:28–47. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-28-49.

23. Хадарцев А. А., Галкин В. А., Башкатова Ю. В., Гавриленко Т. В. Фундаментальные источники непредсказуемости для биосистем у М. Gell-Mann. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:95–108. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-90-102.
24. Газя Г. В., Еськов В. В. Искусственные нейросети в оценке возрастных изменений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(1):101–105. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-1-101-105.
25. Еськов В. В., Газя Г. В., Асриев Е. А. Возрастные аспекты изменения параметров кардиоритма женского населения Севера РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):100–103. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-100-103.
26. Газя Г. В., Еськов В. В., Галкин В. А., Филатова О. Е. Состояние сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли в условиях действия промышленных электромагнитных полей. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):104–108. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-104-108.
27. Коннов П. Е., Филатов М. А., Поросинин О. И., Юшкевич Д. П. Использование искусственных нейросетей в оценке актинического дерматита. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):109–112. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-109-112.
28. Хадарцева К. А., Филатов М. А., Мельникова Е. Г. Проблема однородности выборок параметров сердечно-сосудистой системы приезжих на Севере Российской Федерации. *Экология человека*. 2020;7:27–31. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-7-27-31.
29. Eskov V. M., Filatov M. A., Gazya G. V., Stratan N. F. Artificial Intellect with Artificial Neural Networks. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(3):44–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-3-6.
30. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047:012099. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012099.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-13

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИОКИБЕРНЕТИКИ ИЗ-ЗА НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ВЫБОРОК БИОСИСТЕМ****В. В. Еськов¹, Г. В. Газя², П. Е. Коннов³**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация,
✉ safety.ot86@gmail.com³ Самарский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Самара, Российская
Федерация

Аннотация: в связи с открытием эффекта Еськова–Зинченко (статистической неустойчивости всех выборок любых параметров функций организма) в биокibernетики и кibernетики в целом возникает ряд фундаментальных проблем. Во-первых, доказательство отсутствия дальнейших возможностей применения теории динамических систем и статистики в изучении и описании биосистем. Во-вторых, проблема доказательства отсутствия динамического хаоса в биосистемах. В-третьих, проблема разрешения неопределенностей 1-го и 2-го типа и связи биокibernетики с квантовой механикой. В-четвертых, необходимость решения задач системного синтеза. Все эти четыре проблемы детально рассматриваются в настоящей работе.

Ключевые слова: биосистемы, модели, хаос, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Еськов В. В., Газя П. Е., Коннов П. Е. Фундаментальные проблемы биокibernетики из-за неустойчивости выборок биосистем. *Успехи кibernетики*. 2022;3(4):110–122. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-13.

**FUNDAMENTAL PROBLEMS OF BIOCYBERNETICS CAUSED BY BIOSYSTEM SAMPLE
INSTABILITY****V. V. Eskov¹, G. V. Gazya², P. E. Konnov³**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation, ✉ safety.ot86@gmail.com³ Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

Abstract: since the Eskov–Zinchenko effect was discovered (statistical instability of all samples of any human body parameters), some fundamental problems arose in biocybernetics and cybernetics in general. First, it is the proof of the dynamic systems theory and statistics inapplicability to the study and definition of biosystems. Second, there is no proof on the dynamic chaos absence in biosystems. Third, there is a problem of resolving type 1 and 2 uncertainties and the relation between biocybernetics and quantum mechanics. Fourth, there is the system synthesis problem. All these four problems are discussed in detail in this paper.

Keywords: biosystems, models, chaos, Eskov–Zinchenko effect.

Cite this article: Eskov V. V., Gazya G. V., Konnov P. E. Fundamental Problems of Biocybernetics Caused by Biosystem Sample Instability. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):110–122. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-13.

Введение

В 1947 году Н. А. Бернштейн выдвинул гипотезу о «повторении без повторения» в биомеханике и во всей нервно-мышечной системе [1]. Через год W. Weaver предложил общую классификацию всех систем природы (в виде трех типов систем) и вывел биосистемы (как системы третьего типа — СТТ) за пределы современной детерминистской и стохастической науки (ДСН) [2].

В итоге через 50 лет эти две гипотезы были доказаны как следствие отсутствия статистической устойчивости любой выборки любого параметра функции организма человека (включая и работу мозга, и психическую деятельность человека). Эти данные легли в основу эффекта Еськова–Зинченко (ЭЗЗ) [3–9], который нами изучается вот уже более 20 лет.

В основу ЭЭЗ положено доказательство уникальности (статистической неустойчивости) выборки любого параметра $x_i(t)$, который входит в некоторый вектор состояния функций организма человека $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС). Этот вектор $x(t)$ описывает динамику параметров различных функций организма человека [3–9].

Очевидно, что все это реально выводит все биосистемы за пределы ДСН и требует создания новой (третьей, после ДСН) науки. Эта третья наука должна описывать статистически неустойчивые системы на основе изучения особой динамики $x(t)$ в m -мерном ФПС. В этом случае должна создаваться новая биокибернетика (кибернетика живых систем) на базе нового математического аппарата [3, 4]. Очевидно, что Н. Винер вместе с П. К. Анохиным пытались это делать в 50-60-х годах 20-го века, но они не акцентировали внимание на работах Н. А. Бернштейна и W. Weaver [1, 2].

Первая базовая проблема для ДСН

Напомним, что в теории динамических систем (ТДС) динамика поведения вектора состояния системы $x(t)$ описывается обычно системой дифференциальных уравнений (ДУ), разностных или интегральных уравнений (РУ, ИУ) и других динамических уравнений. В этом случае задание начального состояния $x(t_0)$ для $x(t)$ полностью определяет конечное состояние системы $x(t_x)$.

В ТДС любая такая точка $x(t_0)$, $x(t_x)$ и т. д. может быть повторена большое число раз. В этом случае прошлое ($x(t_0)$) и знание уравнений в виде ДУ, РУ, ИУ и т.д.) полностью определяет динамику процесса. Прошное состояние системы точно определяет ее будущее.

В стохастике это уже невозможно, поэтому при многократном повторении $x(t_0)$ и самого процесса мы получаем набор фазовых траекторий вектора $x(t)$ в ФПС и набор (выборки) конечных значений $x(t)$. В статистике мы не можем работать с одной точкой $x(t_x)$ в ФПС, нужно получить набор (облако) точек в виде некоторой выборки.

В итоге в стохастике появляется неопределенность (одной точкой $x(t_x)$ систему нельзя описывать!) конечного состояния исследуемой системы, и мы вынуждены измерять (путем повторений процесса) выборку и сравнивать две полученные выборки по определенным правилам статистики. Очевидно, что любые две выборки, полученные на разных интервалах времени Δt_1 и Δt_2 , должны совпадать для СТТ, если биосистема неизменна. Это догма всей ДНС [7–9].

Поскольку в стохастике мы не работаем с одной точкой $x(t_x)$ и измеряем систему на интервале Δt_1 (и Δt_2 при второй выборке), то возникает фундаментальная проблема в математике и во всем естествознании: мы не знаем, что было с системой до интервала Δt_1 и после этого интервала (в интервале времени между Δt_1 и Δt_2). Более того, мы не знаем о поведении системы после Δt_2 . Устойчива ли СТТ (это никто не проверял) в биомедицине?

Во всех науках о живых системах (биологии, медицине, психологии, экологии и т. д.) априори считалось (это была догма ДСН), что биосистема устойчива (неизменна) за пределами Δt_1 и Δt_2 . Впервые в этом усомнились Н. А. Бернштейн (повторение без повторений [1]) и W. Weaver [2] (СТТ-биосистемы не объект ДСН). Но они это не доказали численно [1, 2].

Это сделала научная школа биокибернетики и биофизики г. Сургута (Сургутский государственный университет, Сургутский филиал НИИСИ РАН) на основе ЭЭЗ. Для этого мы доказали гипотезу Н. А. Бернштейна (о повторениях) и гипотезу W. Weaver (ДСН не может описывать СТТ-биосистемы).

Первоначально мы проверяли статистическое совпадение двух соседних треморограмм (ТМГ) у одного и того же испытуемого (при регистрации подряд двух выборок ТМГ за 5 секунд). Оказалось, что после 100 повторов таких парных регистраций частота совпадения двух соседних выборок ТМГ $p_{12} \leq 0,05$. По статистике должно быть $p_{12} \geq 0,95$. Более того, сейчас в доказательной медицине требуют вероятность $p_{12} \geq 0,99$ (и даже 0,999). Очевидно, что это фантастические пожелания, которые для СТТ никогда не наблюдаются [7–14].

В дальнейшем мы сравнивали не две соседние выборки (выборки на Δt_1 и Δt_2), а все 15 выборок, которые мы регистрировали у одного испытуемого подряд на 15-ти интервалах Δt_i . В этом случае мы рассчитывали матрицу парных сравнений выборок не только ТМГ, но и теппинграмм (ТПГ), кардиоинтервалов (КИ), различных других параметров $x_i(t)$ работы сердца, выборок электромиограмм (ЭМГ), электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и т. д. [8–18].

Все выборки различных параметров функций организма $x_i(t)$ демонстрировали очень малое число совпадений в таких матрицах парных сравнений выборок. Обычно для ТМГ число k пар выборок, которые имеют критерий Вилкоксона $p_{ij} \geq 0,05$, были $K_1 < 5\%$ из всех 105-ти разных пар сравнения в таких матрицах.

Для управляемых сознанием движений (теппинг — вертикальные равномерные движения пальца испытуемого) $K_2 < 15\%$. Это K_2 совпадало для электромиограмм ($K_3 \leq 15\%$) и кардиоинтервалов ($K_4 \leq 15\%$). Все это очень малые для статистики величины, где обычно $p \geq 0,95$ и числа $K \geq 96$ из 105-ти разных пар.

Очевидно, что число статистических несовпадений выборок очень велико (обычно такое число $r \geq 85\%$), и это доказывает особую динамику любой выборки любого параметра $x_i(t)$ функций организма. Только для ЭЭГ (в спокойном состоянии, сидя с открытыми глазами) $K_5 \leq 35\%$. Это доказывает, что мозг, его нейронные сети (НСМ), более стохастичен, чем органы, которые управляются НСМ (т.е. самим мозгом).

В таком случае любая выборка уникальна и ее статичность невозможна. Вероятность статистического совпадения выборок на интервалах времени Δt_1 и Δt_2 не превышает 0,15 для многих параметров организма человека. Существенно, что это касается не только статистических функций распределения $f(x)$ таких выборок $x_i(t)$, но и их спектральных плотностей сигнала (СПС), автокорреляций (АК) и т. д. [11–18].

Все это получило название эффекта Еськова–Зинченко [3–11], и это доказывает, что статистика (и вся ДСН) не может описывать биосистемы (СТТ). Появляется реальная Complexity, Uncertainty (о которой говорил I. R. Prigogine [19]) и Unpredictability (о которой говорил M. Gell-Mann [20]). Об этом пытался сказать и академик Гинзбург в своих последних публикациях [см., напр., 21], где он прямо говорил об ограничении возможностей современной науки в отношении биосистем: «Вместе с тем, можно ли считать, что возможность редукции биологии к «современной» физике несомненна? Здесь ключевым является слово «современная». И с учетом этого слова дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильно» [21, с. 436].

Прогноз В. Л. Гинзбурга мы доказали за последние 20 лет на примере ЭЭЗ — статистической неустойчивости любых выборок любых параметров биосистем. Гинзбург далее [21] представил гениальную догадку: «Пока дело не сделано, нельзя исключать возможность того, что мы даже на фундаментальном уровне еще не знаем чего-то необходимого для редукции» [21]. Это «фундаментальное» и «необходимое» базируется на отсутствии статистической устойчивости выборки параметров организма человека. В итоге мы доказали неповторимость выборок биосистем (ЭЭЗ) [3–11, 22–30].

Очевидно, что ЭЭЗ применим и для организации функций животного организма. Это мы сейчас доказываем на разных группах подопытных животных. Статистическая неустойчивость выборки сейчас активно нами исследуется, а также усилиями других групп исследователей по другим параметрам организма человека и животных. Это составило базовую основу новой науки, которую мы сейчас обозначили как теорию хаоса-самоорганизации (ТХС) [22–30].

В завершение этого раздела мы демонстрируем два характерных примера матрицы парных сравнений выборок кардиоинтервалов одного и того же испытуемого (15 раз измеряли КИ по 5 минут каждое измерение). В табл. 1 мы представляем критерий Вилкоксона p_{ij} , где число k_4 очень невелико. Напомним, что Европейская ассоциация кардиологов такую выборку КИ считает репрезентативной (но это глубокое заблуждение). Любая выборка КИ — уникальна.

Более того, вместе с ЭЭЗ для одного испытуемого (в режиме 15-ти повторов выборок КИ) мы установили еще одно особое свойство СТТ. Оно следует из ЭЭЗ для одного испытуемого и показывает, что выборки КИ от 15-ти разных испытуемых тоже демонстрируют ЭЭЗ. Однако здесь ситуация гораздо хуже, т. к. якобы неизменная (биологически) выборка КИ не может быть однородной [22–30].

Действительно, если взять 15 человек (одного пола, возраста, проживающих в одинаковых условиях, без патологий и т. д.) и зафиксировать у каждого по одной выборке КИ, то окажется, что все эти выборки статистически не совпадают. Они имеют разные генеральные совокупности.

Для примера мы представляем типичную табл. 2 для 15-ти разных испытуемых (регистрация по 5 минут сидя, в покое). В этой матрице число k соизмеримо с k_4 (для одного испытуемого) в табл. 1. Это означает, что по критерию Манна–Уитни (он использовался в табл. 2) мы имеем статистически разные выборки, которые имеют разные генеральные совокупности, т. е. $p < 0,05$. Очевидно, что группа неоднородна, и по законам статистики мы не можем с ней работать.

Подобных матриц мы построили несколько тысяч для разных групп разных параметров функций организма человека (ТМГ, ТПГ, ЭМГ, КИ, ЭЭГ и т. д.). Везде одинаковый результат: любая группа якобы одинаковых (физиологически и т.д.) людей будет неоднородной [22–30].

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок кардиоинтервалов (КИ) одного и того же человека (без нагрузки, число повторов регистрации КИ $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (критерий различий $< 0,05$, число совпадений $k = 10$) [8]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,02	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00		0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,78		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,25	0,04	0,67	0,73	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25		0,02	0,38	0,49	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02		0,08	0,14	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,38	0,08		0,30	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73	0,49	0,14	0,30		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Таблица 2

Матрица парного сравнения 15-ти выборок кардиоинтервалов (КИ) группы женщин, использовался критерий Манна–Уитни (критерий различий $U < 0,05$, число совпадений $k_1 = 15$) [9]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
6	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00		0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00		0,19	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,19		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	0,00
14	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Фактически такой результат следует из ЭЭЗ. Если любая выборка (для одного испытуемого) будет статистически неоднородной, то тем более выборки одного и того же параметра разных испытуемых тоже не должны совпадать. Табл. 2 и тысячи ей подобных подтверждает это утверждение. В итоге ЭЭЗ как для одного человека, так и для группы разных испытуемых наблюдается всегда [3–11, 22–30].

Однако в последнем случае дело гораздо хуже, мы теперь не можем объединить людей в группу (а на этом построена вся биомедицина), т.к. группа всегда будет неоднородной (выборки $x_i(t)$ принадлежат разным генеральным совокупностям). Все это выводит СТТ за пределы современной науки (ДСН) и требует создания новой (третьей) науки (о чем и говорил Weaver). Это первая базовая проблема ДСН для СТТ.

Проблема динамического хаоса для биосистем

Следует сразу выделить, что целый ряд нобелевских лауреатов высказывались о реальности возникновения динамического хаоса (Лоренца) — ДХ в динамике поведения биосистем. Не будем

представлять цитаты, а отметим, что этому посвящена целая книга I. R. Prigogine (см. «The End of Certainty...», например, [19]) и великолепная статья M. Gell-Mann [20].

Неоднократно на это обращали внимание нобелевский лауреат R. Penrose и В. Л. Гинзбург [21]. Однако академик Гинзбург все-таки надеялся на изменение ситуации с редукцией биологии: «Об этом будущем нельзя не думать с завистью — сколь много важного и интересного мы узнаем даже в ближайшие лет десять» [21, с. 436]. Именно за эти 10 лет мы и доказали реальность ЭЭЗ, но это не динамичный хаос [7–15].

Если говорить детально о ДХ, то за последние 10 лет мы строго доказали его отсутствие в динамике поведения биосистем (СТТ) [7–15]. Действительно, сам ДХ можно диагностировать по ряду характерных математических критериев. Во-первых, задание начальных параметров $x(t_0)$ и динамических уравнений не гарантирует знание $x_i(t_x)$. Для ДХ характерно попадание в странный аттрактор (Лоренца). В таком аттракторе наблюдается равномерное распределение, что характеризуется одинаковой плотностью вероятности (меры инвариантны).

Однако для СТТ это невозможно в принципе. Мы на каждом отрезке времени Δt_i получаем свою статистическую функцию распределения $f_i(x)$. В ЭЭЗ доказано, что выборки $x_i(t)$ на интервале Δt_1 и Δt_2 статистически не совпадают, т. е. их $f_i(x)$ будут разными. Это означает, что для СТТ мы никогда не можем получить равномерное распределение (нет ДХ). Фактически ЭЭЗ доказывает отсутствие эргодичности СТТ, т. к. изменяется $f(x)$, СПС, АК и т.д.

Наши многочисленные исследования показали, что старшие показатели Ляпунова — СПЛ не могут показывать постоянное положительное значение. Они непрерывно изменяют знак (см. рис. 1), и это характерно и в нормогенезе, и при патогенезе (тахикардия, брадикардия). В целом, этот признак (как и другие признаки динамического хаоса) не показывает наличие странного аттрактора (меры не инвариантны).

Все биосистемы не эргодичны, у них нет статистической устойчивости, и хаотично изменяются со временем их статистические функции распределения $f_i(x)$. Поэтому плотности распределений $x_i(t)$ внутри псевдоаттракторов — ПА (это реальные аттракторы для вектора $x(t)$ в ФПС) не инвариантны. Любая выборка $x_i(t)$ будет уникальной (статистически неповторимой). Этот первый критерий ДХ не подходит для СТТ. Биосистемы не эргодичны, и их невозможно описывать в рамках статистики (меры не инвариантны!).

Еще раз отметим, что внутри странного аттрактора Лоренца плотности распределения точек $x(t_x)$ будут инвариантны. Но в псевдоаттракторах Еськова (ПА) таких свойств у вектора состояния СТТ нет (для СТТ непрерывно изменяются их статистические функции $f(x_i)$). Нет статистической устойчивости выборок (ЭЭЗ).

Последнее означает, что до интервала Δt_1 , между Δt_1 и Δt_2 и после Δt_2 все выборки будут различимы (их примеры выше в табл. 1 и 2). Это означает, что центральная догма ДСН для СТТ не выполняется, и это открытие (ЭЭЗ), которое полностью закрывает редукцию биологии на законы физики. В рамках статистики (ДСН) СТТ не описываются.

Гинзбург был прав, через 10 лет мы открыли ЭЭЗ и редукция невозможна. Нужна «новая физика», а также — новая биофизика и новая биомедицина. Это уже выходит за границы прогноза Гинзбурга [21] (см. цитату выше). Нужна ТХС.

Отметим, что ДХ является отдельным разделом ТДС и его отсутствие у СТТ доказывает полную неприменимость ТДС и детерминизма в целом к описанию биосистем. ДХ не имеет места у СТТ.

Действительно, в наших многочисленных исследованиях мы показали, что старшие показатели Ляпунова (СПЛ) хаотично изменяют знак на любом отрезке времени регистрации любого параметра функции организма человека. Для примера мы представляем рис. 1, где показана динамика λ_i для 15-ти разных выборок КИ (у одного и того же испытуемого).

На этом рисунке мы представили расчет старшего показателя Ляпунова λ для 15-ти разных выборок КИ, которые были получены от одного и того же испытуемого. Регистрация каждой выборки производилась 5 минут (подряд) сидя, в спокойном состоянии. Очевидно, что значения λ_i разные по знаку (и по величине) для каждой выборки.

Разные выборки у одного и того же испытуемого за 5 минут могут показывать как положительные значения λ_i , так и отрицательные. Это означает, что какие-то выборки могут показать динамичный хаос Лоренца, а какие-то нет. Более того, λ_i меняет знак внутри каждого интервала в 5 минут (если

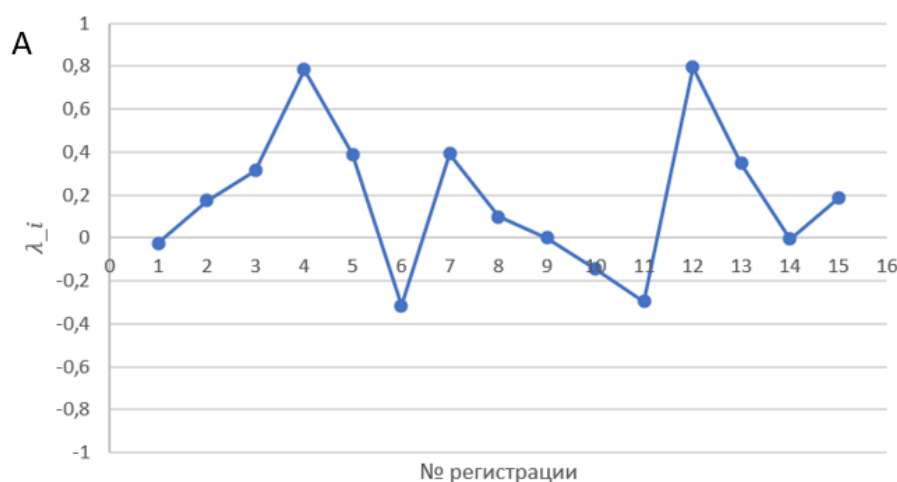


Рис. 1. Расчет СПЛ для временных рядов КИ испытуемого в состоянии нормогенеза

его разделить, например, на 10 частей).

В итоге на рисунке 1 представлена картина поведения старшего показателя Ляпунова (СПЛ) для 15-ти выборок КИ у одного и того же испытуемого (в спокойном состоянии, сидя). Очевидно, что СПЛ непрерывно меняет знак (от выборки к выборке), и это говорит об отсутствии ДХ.

Детальный расчет для каждой выборки (всего 15 выборок для одного испытуемого) представлен в табл. 3. Здесь даны значения СПЛ и его статистический расчет (Δ_x и ε в %).

Таблица 3

Результаты расчета СПЛ (λ_i) для 15-ти повторов регистраций кардиосигналов

№ рег- ии КИ	Состояния								
	Нормогенез			Брадикардия			Тахикардия		
	λ_i	Δ_x	ε , %	λ_i	Δ_x	ε , %	λ_i	Δ_x	ε , %
1	-0,0247	0,11	1,37%	-0,3415	0,9798	1,03%	0,1696	0,77	0,85%
2	0,1750	0,40	0,70%	-0,3102	0,17	0,20%	-0,0512	0,73	2,70%
3	0,3131	0,71	0,70%	-0,1427	0,1	0,25%	0,4498	0,26	0,12%
4	0,7822	0,56	0,22%	-0,3354	0,26	0,28%	-0,0580	0,02	0,07%
5	0,3893	0,69	0,54%	0,0557	0,65	4,33%	0,0278	0,83	6,38%
6	-0,3144	0,13	0,13%	-0,1871	0,58	1,12%	-0,1779	0,35	0,36%
7	0,3930	0,91	0,71%	-0,8426	0,76	0,32%	-0,2898	0,88	0,54%
8	0,0977	0,03	0,09%	-0,2414	0,82	1,22%	-0,0470	0,73	2,70%
9	0,0012	0,39	0,00%	0,1884	0,93	1,79%	0,0278	0,86	6,62%
10	-0,1461	0,91	1,94%	-0,0940	0,4	1,54%	-0,2006	0,5	0,50%
11	-0,2959	0,05	0,05%	-0,2027	0,97	1,73%	-0,0512	0,73	2,70%
12	0,7939	0,41	0,16%	-0,0583	0,39	2,44%	0,4498	0,26	0,12%
13	0,3469	0,80	0,71%	0,6189	0,9	0,52%	0,1696	0,77	0,85%
14	-0,0056	0,83	0,75%	-0,1207	0,9	2,73%	-0,0494	0,82	3,16%
15	0,1859	0,98	1,63%	0,3058	0,94	1,11%	-0,0580	0,02	0,07%

Одним из важнейших признаков ДХ Лоренца (странного аттрактора — СА) является поведение автокорреляционных функций (АКФ). На рис. 2 мы представляем расчет всех этих 15-ти АКФ для указанных выборок КИ (для одного и того же испытуемого). Из рис. 2 следует, что АКФ не стремятся к нулю, а хаотично изменяют знак с увеличением времени t .

Таким образом, рис. 2 показывает, что АКФ не стремятся к нулю, а ведут себя хаотично. Изменение знака и отсутствие асимптот (в виде нуля) показывает отсутствие ДХ для КИ. Это показывает отсутствие ДХ у КИ по критерию АКФ.

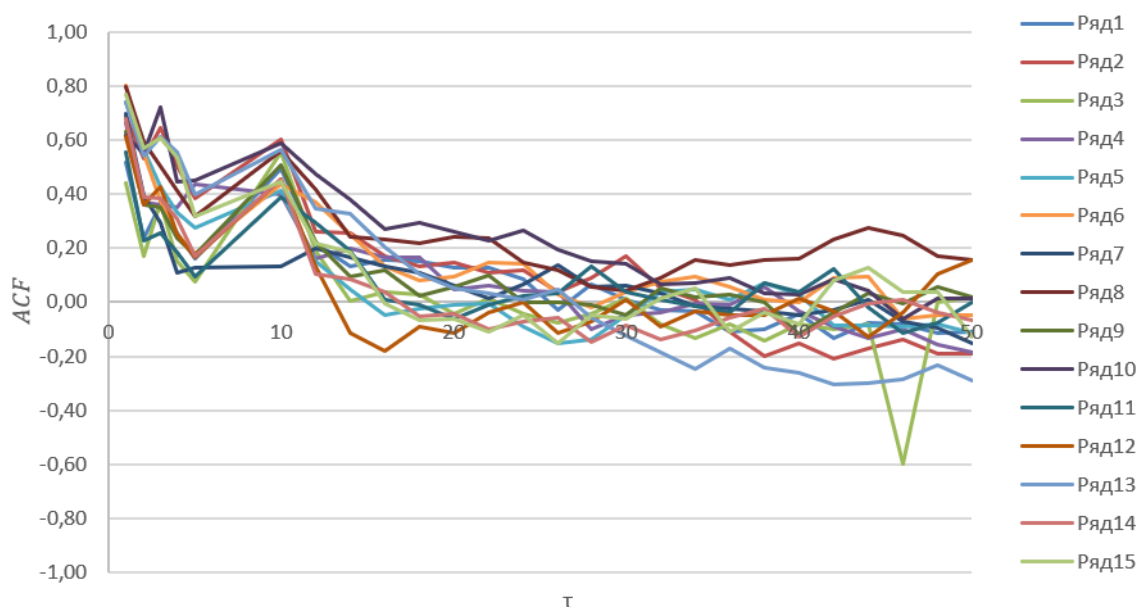


Рис. 2. Коррелограмма временных рядов кардиоинтервала (15 регистраций) обследуемой в состоянии нормогенеза

В итоге СПЛ не имеет положительного знака (для любых выборок). АКФ не стремится к нулю, и нет равномерного распределения внутри псевдоаттрактора (ПА). Все это доказывает отсутствие хаоса Лоренца, т. е. нет странного аттрактора для выборок КИ. Надежды нобелевских лауреатов не оправдались: ДСН не работает в описании СТТ.

Подчеркнем, что аналогичная зависимость получена и для тремора (ТМГ), теппинга (ТПГ), ЭМГ, ЭЭГ и т. д. Любая выборка любого параметра функции организма человека $x_i(t)$ не может демонстрировать ДХ. Это полностью закрывает возможности ТДС в описании СТТ [3–11].

Еще раз напомним, что целая группа нобелевских лауреатов (I. R. Prigogine, R. Penrose, M. Gell-Mann, В. Л. Гинзбург) очень надеялась на динамичный хаос в описании биосистем. Это было глубоким заблуждением. Мы доказываем обратное: нет СА Лоренца в поведении биосистем. СТТ не могут генерировать ДХ.

Тем самым мы полностью доказываем отсутствие возможности дальнейшего применения всей теории динамических систем в описании живых систем. Точнее говоря, любую динамику поведения СТТ мы опишем (приблизительно) в ТДС, но нет прогноза будущего. Любая такая модель уникальна, как и выборки в статистике [3–11].

Любая модель в рамках ТДС имеет исторический характер, нет прогноза будущего. Тогда такие модели (в рамках ТДС) нет смысла использовать. Напомним, что признаки науки (главные) — это повторяемость и прогноз, но для СТТ это невозможно. Тогда становится очевидным, что СТТ не объект ДСН.

Неопределенность 1-го и 2-го типа для СТТ и квантовая механика

Напомним, что начало 20 века было связано с появлением новой физики для описания неживой материи. Появилась квантовая механика (КМ), и один из ее главных принципов — принцип неопределенности Гейзенберга. В целом, это было началом новой физики. Нечто подобное сейчас предлагаем и мы во всей биомедицине, во всех науках о новых системах.

Однако квантовая механика не вышла за пределы методов теории вероятности и статистики. Вся современная КМ основана на аппарате ДСН и никак не выходит за пределы современной науки. При этом W. Weaver предлагал выйти за пределы ДСН для описания любой биосистемы (СТТ) [2].

Weaver предлагал создать новую (третью, после ДСН) науку, в которой были бы другие принципы, модели и методы. Доказав за последние 20 лет ЭЭЗ в виде отсутствия статистической устойчивости выборок, мы доказали неизбежность выхода СТТ за пределы ДСН.

То, что ТДС (детерминистская наука) не может оценивать СТТ, уже следует из предыдущих двух параграфов. Очевидно, что ЭЭЗ доказывает невозможность дальнейшего использования и сто-

хастического подхода. Стохастика не работает (нет прогноза будущего) в описании биосистем (СТТ) [3–11].

Любая выборка уникальна и мы на основе ЭЕЗ вводим понятие неопределенности второго типа (НВТ). Возникает закономерный вопрос: может ли НВТ как-то быть связана с принципом неопределенности Гейзенберга?

Напомним, что в КМ этот принцип неопределенности накладывает ограничения на две фазовые координаты квантовой частицы: ее координату $x_1(t)$ и ее скорость $x_2(t)=dx_1/dt$. В этом случае Гейзенберг предложил неравенство:

$$\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq h/4 \pi m. \quad (1)$$

В этом неравенстве (1) мы слева перенесли массу частицы m вправо. Отметим, что для малых скоростей эта масса m не зависит от x_2 и мы ее можем считать некоторой константой ($m=\text{const}$). В итоге неравенство (1) имеет вид:

$$\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq z_1 \quad (z_1 = \text{const}). \quad (2)$$

Фактически мы накладываем ограничения на вариации (изменения Δx_1) этих двух фазовых координат. Эти ограничения накладываются снизу (имеем знак $\geq$). Мы использовали такой подход в описании СТТ — complexity.

При этом мы вводим ограничения на поведение (вариации) любого диагностического признака $x_1(t)$ (в виде Δx_1) и его скорость изменения Δx_2 ($x_2 = dx_1/dt$). Для биосистем можно ввести некоторый аналог принципа Гейзенберга и получить новое неравенство, но оно имеет дополнение (ограничение сверху).

Это неравенство превращается в систему неравенств вида:

$$z_2 \geq \Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \geq z_1. \quad (3)$$

В этом случае мы не только ограничиваем произведение Δx_1 и Δx_2 частично снизу (в виде z_1), но и сверху (в виде z_2). Возникает неопределенность 2-го типа (НВТ) для всех биосистем (СТТ) [3–15].

Подчеркнем, что ограничение в виде системы неравенств (3) на двумерной фазовой плоскости выглядит в виде прямоугольника со сторонами Δx_1 и Δx_2 . Внутри этого прямоугольника (назовем его псевдоаттрактор — ПА) хаотично движется $x^*(t)$. При этом хаотично изменяются $f(x)$, СПС, АФК и т. д. [3–11].

Этот вектор $x^*(t)$ имеет две координаты ($x^*(t) = (x_1, x_2)^T$), которые невозможно (точно или статистически) для любой биосистемы прогнозировать. Мы ничего не знаем о будущем фазовой траектории вектора $x^*(t)$. Но при этом уверены, что движение $x(t)$ будет внутри данного ПА на фазовой плоскости вектора $x^*(t)$.

На сегодня мы установили, что площадь ПА $S = \Delta x_1 \cdot \Delta x_2$ (где Δx_1 — вариационный размах по координате x_1 , а Δx_2 — вариационный размах x_2) статистически сохраняется. Это означает, что при неизменном аналогичном состоянии СТТ величина $S \approx \text{const}$ (с позиции статистики по выборкам этих S для ПА).

Мы сделали тысячи опытов по расчетам площадей S выборок ПА для разных параметров $x_i(t)$ функций организма человека и доказали статистическую устойчивость выборок S для ПА у одного испытуемого (в его неизменном биологическом, психическом состоянии).

Для примера мы представляем характерную таблицу 4 расчета 15-ти выборок S для ПА у одного и того же испытуемого (выборки для ПА по расчету КИ). В этой таблице 4 мы показали (в виде столбцов) расчет S ПА для каждой серии регистраций выборок ПА для КИ. Очевидно, что всего столбцов 15, и в каждом столбце по 15 значений S .

Фактически речь идет о 15-ти сериях наблюдений за одним и тем же испытуемым. В каждой такой серии мы регистрировали по 15 выборок КИ (каждая выборка КИ — это 5 минут регистрации КИ). В итоге мы получили 15 выборок (столбцов) S для 225 выборок КИ.

Подобные регистрации мы делали для многих испытуемых, и везде одна закономерность: выборки S для КИ статистически существенно различаются. Парное сравнение всех таких выборок S для КИ статистически существенно не различается. Парное сравнение таких выборок S показало, что частота их совпадения $p^* \geq 0,9$.

Таблица 4

Матрица расчета выборов S для псевдоаттракторов параметров 225-ти выборов КИ одного и того же испытуемого (без нагрузки в каждом столбце число повторов $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (критерий различия $p < 0,05$, число совпадений $k_1 = 94$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,16	0,64	0,57	0,05	0,95	0,78	0,13	0,82	0,65	1,00	0,17	0,11	0,09	0,14
2	0,16		0,05	0,10	0,65	0,19	0,31	0,57	0,46	0,50	0,13	0,82	0,83	0,88	0,95
3	0,64	0,05		0,65	0,03	0,78	0,46	0,02	0,61	0,61	0,86	0,05	0,03	0,02	0,13
4	0,57	0,10	0,65		0,04	0,73	0,57	0,05	0,25	0,91	0,57	0,07	0,02	0,03	0,09
5	0,05	0,65	0,03	0,04		0,19	0,23	0,59	0,23	0,16	0,13	0,43	0,78	0,46	0,65
6	0,95	0,19	0,78	0,73	0,19		0,17	0,03	0,50	0,95	0,95	0,28	0,10	0,11	0,21
7	0,78	0,31	0,46	0,57	0,23	0,17		0,09	0,65	0,95	0,82	0,21	0,08	0,16	0,28
8	0,13	0,57	0,02	0,05	0,59	0,03	0,09		0,11	0,36	0,08	0,46	0,53	0,23	1,00
9	0,82	0,46	0,61	0,25	0,23	0,50	0,65	0,11		0,92	0,86	0,86	0,50	0,50	0,57
10	0,65	0,50	0,61	0,91	0,16	0,95	0,95	0,36	0,92		0,86	0,50	0,09	0,50	0,61
11	1,00	0,13	0,86	0,57	0,13	0,95	0,82	0,08	0,86	0,86		0,43	0,08	0,24	0,21
12	0,17	0,82	0,05	0,07	0,43	0,28	0,21	0,46	0,86	0,50	0,43		0,73	0,65	0,73
13	0,11	0,83	0,03	0,02	0,78	0,10	0,08	0,53	0,50	0,09	0,08	0,73		0,78	0,95
14	0,09	0,88	0,02	0,03	0,46	0,11	0,16	0,23	0,50	0,50	0,24	0,65	0,78		0,61
15	0,14	0,95	0,13	0,09	0,65	0,21	0,28	1,00	0,57	0,61	0,21	0,73	0,95	0,61	

Обычно $p^* \geq 0,95$, что уже удовлетворяет требованиям статистики. В итоге мы сейчас говорим о том, что площадь S для ПА является инвариантом. Она (S) объективно представляет неизменность физиологического (психического) состояния человека. Если это состояние изменяется (например, дается физическая нагрузка (приседания)), то площадь S тоже изменяется. Это показали наши многочисленные исследования с ТМГ, ТПГ, ЭМГ, ЭЭГ и другими параметрами функций организма человека.

Отметим, что кроме неопределенностей 2-го типа (в виде ЭЕЗ) для СТТ мы установили и неопределенность 1-го типа. В этом случае с биосистемой происходят существенные изменения, но статистика это не демонстрирует. Статистика не работает.

С позиций статистики выборки $x_i(t)$ совпадают и нет различий между группами разных больных, между больными и здоровыми организмами и т. д. Статистика не может показать различия, и нужна другая (третья) наука. Сейчас это ТХС.

Поскольку таких примеров мы предоставили очень много для ТМГ, ТПГ, ЭМГ, КИ, ЭЭГ (и т.д.), то сейчас рассмотрим примеры из области теории гомеостаза. В частности, примеры с иммунологическими параметрами больных кожными заболеваниями.

Обследовалось три группы больных с хроническим атопическим дерматитом (ХАД). В 1-ю группу ($EASI < 10$) входили больные с вовлечением открытых участков тела (шея, голова, кисти и т.д.). Назовем это первой стадией ХАД (клиническая классификация).

Вторую группу образовывали больные с распространенной формой ХАД (эритемы более обширны, инфильтрации ($EASI = 10-25$)). Наконец, третья группа ($EASI > 25$) имела развившиеся диффузионные поражения кожи (зуд). Клинически это все разные группы, но статистически выявить различия между ними крайне трудно.

Для этих трех групп мы регистрировали 5 параметров иммунного статуса: иммуноглобулины x_1 — IgA г/л, x_2 — IgG г/л, x_3 — IgM г/л, x_4 — ФН нг/мл, x_5 — IgE Мед/л. В итоге мы получили по 5 выборов x_i для каждой группы.

Эти выборы мы попарно сравнивали для каждого параметра x_i . В итоге мы получили табл. 5. В этой таблице мы представили непараметрические критерии Вилкоксона p_{ij} для каждой этой пары. Результаты очевидны, во всех случаях критерий $p_{ij} \geq 0,05$. Это означает, что выборы статистически совпадают (имеют общую генеральную совокупность).

В итоге в табл. 5 мы не имеем ни одной статистически различающейся пары выборов всех 5-ти признаков. Везде критерий Вилкоксона $p_{ij} \geq 0,05$. Выборы статистически совпадают. Очевидно, что в этом случае нет статистических различий, и это означает, что ДСН не может различать группы, которые клинически различаются.

Возникает неопределенность 1-го типа: статистика не показывает различий состояний пациен-

Таблица 5

Результаты попарного сравнения значений рангов допустимого уровня значимости биохимических параметров мужчин с помощью непараметрического критерия Вилкоксона ($P \geq 0,05$) [18]

	X ₁ (IgA г/л)	X ₂ (IgG г/л)	X ₃ (IgM г/л)	X ₄ (ФН нг/мл)	X ₅ (IgE Мед/л)
Группа 1 — группа 2	0,586181	0,244649	0,277531	0,459085	0,395753
Группа 1 — группа 3	0,806766	0,977345	0,777565	0,777565	0,649563
Группа 2 — группа 3	0,185017	0,170600	0,192986	0,395753	0,556580

тов (по анализу различий выборок), но медицина их различает (выделяет три группы больных).

Проблема системного синтеза (СС)

Во многих случаях в рамках современной ДСН возникают задачи, когда надо найти главные диагностические признаки. Однако найти их в рамках ДСН часто невозможно. Задача еще более усложнилась после доказательства ЭЕЗ и реальности неопределенности 1-го и 2-го типов.

В этом случае ДСН вообще не работает, но ее необходимо выполнить. В науке сейчас часто это делают гениальные люди. В этом случае мы говорим об эвристической работе мозга человека (его НСМ). Общего решения задачи СС в современной математике нет (ДСН не работает).

Рассмотрим эту фундаментальную проблему более подробно на конкретном примере из медицины. Подчеркнем, что мы специально берем пример из параметров гомеостаза (параметров крови больных ХАД), т.к. для многих функциональных систем мы это уже демонстрировали многократно (на примере нервно-мышечной системы — НМС и сердечно-сосудистой системы — ССС) [3–11].

Выше, в табл. 5, мы представили результаты попарного сравнения пяти условных показателей иммуноглобулинов у больных ХАД. Из этой таблицы следует, что ни одна пара не может показать критерий Вилкоксона $p_{ij} < 0,05$.

Это означает, что любая пара выборок этих x_i ($i=1, 2, \dots, 5$) не может статистически различаться, они имеют общую генеральную совокупность ($p_{ij} \geq 0,05$). Однако использование искусственной нейросети (ИНС) в двух особых режимах резко меняет эту ситуацию.

Подчеркнем, что сейчас ИНС довольно часто используется в режиме бинарной классификации. В этом случае могут сравниваться два набора выборок. Например, эта задача решается с помощью ИНС при сравнении двух параметров (в кардиологии, например).

В нашем случае мы имеем 5 признаков x_i (их выборки) для одной группы и для другой. Например, в табл. 5 сравнивались группа 1 и группа 2. При этом все $p_{ij} \geq 0,2$, т. е. все выборки совпадали. Имеется неопределенность 1-го типа.

Очевидно, что в этом случае мы не можем ранжировать значимость признаков (статистика не работает). При этом вся ДСН не может быть использована из-за статистического совпадения выборок. Но ИНС в двух особых режимах решает эту задачу. Эти режимы связаны с хаосом и реверберациями ИНС [24–30].

В табл. 6 мы представляем статистически усредненные веса (w_i) признаков x_i после 50-ти итераций (настройки ИНС). Эти итерации реализовывались в режиме задания хаоса начальных весов w_i признаков x_i . Для каждой (новой) итерации задавались w_i хаотично из интервала $w_i \in (0,1)$.

В итоге мы получали по 50 значений весов признаков w_i и такие выборки статистически обрабатывали. В табл. 6 имеются параметры порядка (главные диагностические признаки). Это: x_5 — IgE (его $\langle w_5 \rangle = 0,45$) и x_4 — ФН (его $\langle w_5 \rangle = 0,305$). У этих двух признаков наибольшие веса, а остальные показывают $\langle w_i \rangle < 0,1$, т. е. они имеют малое значение для диагностики различий групп 1 и 2.

Характерно, что в статистике эти два признака имели $p_{ij} = 0,459$ и $p_{ij} = 0,396$ соответственно. Это мало отличается от IgA, который в табл. 6 имеет средний вес $\langle w_1 \rangle = 0,094$. Иными словами, в статистике эти два признака очень слабо информативны, но в ИНС они имеют главные значения (это и есть параметры порядка).

Подчеркнем, что эти два новых режима ИНС следуют из ЭЕЗ, в котором мы рассматриваем хаос выборок и нам требуется многократно повторно регистрировать и анализировать многочисленные выборки.

Таблица 6

Результаты 50-ти обучений (парное сравнение) нейронной сети (ранговые значения в у. е.)
биохимических параметров крови пациентов (n=18) [18]

	IgA	IgG	IgM	ФН	IgE
Группа 1 — группа 2	0,093800	0,098800	0,085800	0,304800	0,418800

Очевидно, что хаос и многократные реверберации являются основой работы мозга, его НСМ. И это мы доказали по анализу электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Именно выборка ЭЭГ везде демонстрирует хаос и многократные повторения. В покое мозг не может находиться. Хаос и реверберации — это основа работы НСМ, и мы это перенесли в ИНС. Работа ИНС в этих двух особых режимах обеспечила нам нахождение главных диагностических признаков (x_5 и x_4). Это в статистике (и ДСН в целом) невозможно.

Заключение

Доказательство отсутствия статистической устойчивости выборок любых параметров любых функций организма человека приводит к появлению четырех фундаментальных проблем для всей современной науки. Во-первых, невозможно применить теорию динамических систем для описания и прогнозирования (а это главное!) биосистем. Это фундаментальная проблема для ДСН, и она сразу делает бесполезными все модели в биомедицине.

Во-вторых, доказываемое отсутствие динамического хаоса Лоренца у СТТ, на что очень надеялись ряд нобелевских лауреатов (I. R. Prigogine, M. Gell-Mann, В. Л. Гинзбург, R. Penrose). Это полностью закрывает проблему дальнейшего использования ДУ, РУ (и т. д.) в описании любых неустойчивых биосистем. Вся ТДС не работает для описания СТТ.

В-третьих, возникают неопределенности 1-го и 2-го типов, которые невозможно разрешать в рамках современной науки. Нужна новая (третья по W. Weaver) наука для описания и прогнозирования СТТ — Complexity. Мы предлагаем ТХС.

В-четвертых, человечество подошло к решению задач системного синтеза. В этом случае необходимо создавать новый математический аппарат для разрешения неопределенности 1-го и 2-го типов, нахождения параметров порядка (главных диагностических признаков в биомедицине), нахождения русел и джokers. Все это требует создания новой науки для описания биосистем в биомедицине. В ТХС все это становится возможным.

ЛИТЕРАТУРА

- Bernstein N. A. *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford, New York: Pergamon Press; 1967. 196 p.
- Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36(4):536–544.
- Башкатова Ю. В., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Состояние сердечно-сосудистой системы спортсменов при нагрузке на Севере Российской Федерации. *Экология человека*. 2020;6:41–45. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-6-41-45.
- Grigorenko V. V., Nazina N. B., Filatov M. A., Chempalova L. S., Tretyakov S. A. New Information Technologies in the Estimation of the Third Type Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032003.
- Филатов М. А., Иляшенко Л. К., Колосова А. И., Макеева С. В. Стохастический и хаотический анализ параметров внимания учащихся разных экологических зон. *Экология человека*. 2019;7:11–16. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-7-11-16.
- Filatov M. A., Poluhin V. V., Shakirova L. S. Identifying Objective Differences Between Voluntary and Involuntary Motion in Biomechanics. *Human. Sport. Medicine*. 2021;21(1):145–149. DOI: 10.14529/hsm210118.
- Хадарцева К. А., Филатов М. А., Мельникова Е. Г. Проблема однородности выборок параметров сердечно-сосудистой системы приезжих на Севере Российской Федерации. *Экология человека*. 2020;7:27–31. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-7-27-31.

8. Филатова О. Е., Еськов В. М., Галкин В. А., Музиева М. И., Кухарева А. Существуют ли отличия классификации систем искусственного интеллекта? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:48–59. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-50-61.
9. Буданов В. Г., Асеева И. А., Зотов В. В. Моделирование социотехнической конвергенции в цифровых сетевых пространствах: возможности и риски. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:60–72. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-62-70.
10. Козлова В. В., Галкин В. А., Филатов М. А., Еськов В. М. Моделирование нейросетей мозга с позиций гипотезы W. Weaver. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;1:59–68. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-52-59.
11. Филатова О. Е., Галкин В. А., Башкатова Ю. В., Шакирова Л. С. Новые возможности нейрокомпьютеров в биомедицине. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;3:5–16. DOI: 10.12737/2306-174X-2021-5-14.
12. Еськов В. В., Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Юшкевич Д. П., Поросинин О. И. Моделирование неопределенностей в рамках компартментно-кластерной теории. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2021;4:85–94. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-61-72.
13. Еськов В. М., Филатова О. Е., Галкин В. А., Филатов М. А., Чиркова Р. В. Возможны ли инварианты в теории хаоса-самоорганизации? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:84–94. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-79-89.
14. Хадарцев А. А., Галкин В. А., Башкатова Ю. В., Гавриленко Т. В. Фундаментальные источники непредсказуемости для биосистем у M. Gell-Mann. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:95–108. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-90-102.
15. Газя Г. В., Еськов В. В. Искусственные нейросети в оценке возрастных изменений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(1):101–105. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-1-101-105.
16. Еськов В. В., Газя Г. В., Асриев Е. А. Возрастные аспекты изменения параметров кардиоритма женского населения Севера РФ. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):100–103. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-100-103.
17. Газя Г. В., Еськов В. В., Галкин В. А., Филатова О. Е. Состояние сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли в условиях действия промышленных электромагнитных полей. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):104–108. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-104-108.
18. Коннов П. Е., Филатов М. А., Поросинин О. И., Юшкевич Д. П. Использование искусственных нейросетей в оценке актинического дерматита. *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(2):109–112. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-2-109-112.
19. Prigogine I. R. *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. The Free Press; 1996.
20. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability. *Complexity*. 1997;3(1):13–19.
21. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? *Успехи физических наук*. 1999;169:419–441. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199904d.0419.
22. Eskov V. M., Filatov M. A., Gazya G. V., Stratan N. F. Artificial Intellect with Artificial Neural Networks. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(3):44–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-3-6.
23. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047:012099. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012099.
24. Kozlova V. V., Galkin V. A., Filatov M. A. Diagnostics of Brain Neural Network States from the Perspective of Chaos. *Journal of Physics Conference Series*. 2021;1889(5):052016 DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052016.
25. Khromushin V. A., Pyatin V. F., Eskov V. V., Ilyashenko L. K., Vokhmina Yu. V. New Principles in the Operation of Neural Emulators in Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering*. 2019;53(2):117–120.
26. Filatova O. E. Standardizing Measurements of the Parameters of Mathematical Models of Neural Networks. *Measurement Techniques*. 1997;40(1):55–59. DOI: 10.1007/BF02505166.
27. Eskov V. V., Pyatin V. F., Eskov V. V., Ilyashenko L. K. Heuristic Work of the Brain and Artificial Neural Networks. *Biophysics*. 2019;64(2):293–299. DOI: 10.1134/S0006350919020064.
28. Filatova O. E. Measurement and Control Facilities for Investigating Neuron Systems. *Measurement*

Techniques. 1998;41(3):229–232. DOI: 10.1007/BF02503888.

29. Vokhmina Y. V., Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Filatova O. E. Measuring Order Parameters Based on Neural Network Technologies. *Measurement Techniques*. 2015;58(4):462–466. DOI: 10.1007/S11018-015-0735-X.
30. Eskov V. M. Models of Hierarchical Respiratory Neuron Networks. *Neurocomputing*. 1996;11(2–4):203–226. DOI: 10.1016/0925-2312(95)00048-8.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

А. И. Антонов¹, Ю. М. Денчик^{2,a}, Е. В. Иванова^{2,a}, М. Н. Романов^{2,b}, В. Г. Сальников³

¹ Омский институт инженеров водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск, Российская Федерация, aleksandr_antonov_85@mail.ru

² Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Российская Федерация,

^a kese@nsawt.ru, ^b m.n.romanov@nsawt.ru

³ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация, Salnikov_vg@surgu.ru

Аннотация: рассматривается электромагнитная обстановка в электрических сетях общего назначения. Анализ показывает, что в настоящее время существует задача обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. Одним из параметров, влияющих на качество электрической энергии, является несимметрия напряжений в трехфазных сетях, приводящая к отклонениям величины напряжения, росту потерь, ухудшению условий работы электрооборудования. Разработка и использование на производстве способов и устройств, позволяющих повысить качество электроэнергии, приобретает на этом фоне неоспоримую актуальность. В рамках концепции «Интеллектуальные сети» среди требований, предъявляемых к распределительным сетям, устройствам потребления и производства электроэнергии, ее передаче к конечному потребителю, можно выделить необходимость повышения эффективности применения новых технологий и электротехнических устройств, использования ресурсов с максимальной эффективностью. В работе приведено описание разработанной программы для ЭВМ. Достоинством данной программы является полная совместимость с программами Matlab (приложение Simulink), Mathcad, а также большое число виртуальных приборов и средств управления. Программа в автоматическом режиме производит необходимые вычисления и выводит полученные результаты в удобной для пользователя форме: в виде графиков, осциллограмм, гистограмм и др.

Ключевые слова: искажение симметричности питающего напряжения, показатели качества электроэнергии, электромагнитная низкочастотная кондуктивная помеха, совместимость технических средств электромагнитная, несимметричные режимы, электрическая сеть.

Для цитирования: Антонов А. И., Денчик Ю. М., Иванова Е. В., Романов М. Н., Сальников В. Г. Развитие электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):123–129. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14.

ASYMMETRIC MODE SIMULATION FOR ELECTRIC GRID DESIGN

A. I. Antonov¹, Yu. M. Denchik^{2,a}, E. V. Ivanova^{2,a}, M. N. Romanov^{2,b}, V. G. Salnikov³

¹ Water Transport Engineering School, Siberian State University of Water Transport, Omsk, Russian Federation, aleksandr_antonov_85@mail.ru

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation,

^a kese@nsawt.ru, ^b m.n.romanov@nsawt.ru

³ Surgut State University, Surgut, Russian Federation, Salnikov_vg@surgu.ru

Abstract: this study deals with the electromagnetic environment of electric grids and electromagnetic compatibility issues. One of the electric power quality indicators is the voltage asymmetry in 3P grids, which leads to voltage deviations, increased losses, and deterioration of the electrical equipment operating conditions. There is need for methods and devices to increase the quality of electric power. Within the Smart Grid concept, one of the key requirements is to increase the resource utilization efficiency, introduce advanced technologies and equipment. The paper presents the software developed by the authors. It is fully compatible with Matlab (Simulink application), MathCAD, as features a large number of virtual instruments and controls. The software is automatic and user-friendly. The reports are curves, oscillograms, histograms, etc.

Keywords: voltage asymmetry, power quality, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, software, electromagnetic environment, asymmetric modes, electrical network.

Cite this article: Antonov A. I., Denchik Yu. M., Ivanova E. V., Romanov M. N., Salnikov V. G. Asymmetric Mode Simulation for Electric Grid Design. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):123–129. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-14.

Эффективная и надежная работа электрооборудования напрямую связана с показателями качества электроэнергии в сетях распределения. Проблема обеспечения качества электрической энергии многогранна. Необходимо изучение источников и видов электромагнитных помех в исследуемых сетях, степени восприимчивости электрооборудования к помехам и способов воздействия на них, разработка нормативной документации, в которой определены приемлемые уровни показателей качества электрической энергии, разработка методики и средств для измерений показателей качества электроэнергии.

Среди основных источников электромагнитных помех, распространяемых по проводам и связанных с низкими частотами, вызывающих искажение синусоидальности формы кривой питающего напряжения, можно выделить повсеместно использующиеся преобразователи и стабилизаторы, имеющие в своей конструкции полупроводниковые вентильные элементы (диоды, тиристоры, транзисторы), обладающие ярко выраженной нелинейностью вольт-амперных характеристик. Причем такие типы преобразователей получают в последнее время все большую область применения, включая и бытовых потребителей.

В электрических сетях напряжением 110 кВ и больше используется концепция «Сильные сети», построенная на базе «Flexible Alternative Current Transmission System» (FACTS) и направленная в большинстве случаев на увеличение пропускной способности линии электропередачи. Для электрических сетей общего назначения, характеризующихся средними величинами напряжений, применяется технология «Интеллектуальные сети», определяющая направление развития сетей до 2030 года.

Концепцию «Smart Grid» (интеллектуальная сеть) можно представить как однородный автоматизированный комплекс, объединяющий в своем составе производство, распределение и потребление электрической энергии. Такая система должна управляться через компьютерный узел, куда в режиме реального времени должна поступать информация с цифровых датчиков, соответствующая уровню потребления электроэнергии. Применение данной концепции позволяет увеличить до максимума эффективность использования различного вида ресурсов, технического оборудования и технологий на всех этапах электроснабжения: производстве, распределении и потреблении электрической энергии. Такая задача может быть решена при высоко развитой системе математического моделирования различных режимов работы электроэнергетической системы, что позволит обеспечить электромагнитную совместимость технических средств.

Показатели качества электроэнергии определяются множеством параметров, к одному из них относится несимметрия напряжения в трехфазных сетях. Явление несимметрии напряжения приводит к отклонениям величины напряжения в сети, увеличению потерь в самой сети и подключенном к ней электрооборудовании, ухудшению условий работы электрооборудования и т. п. Разработка и использование на производстве способов и устройств, позволяющих повысить качество электроэнергии, приобретает на этом фоне неоспоримую актуальность.

Задача повышения технико-экономических показателей электрических сетей с помощью существенного понижения несимметрии напряжения играет существенную роль, при этом актуальным является решение научно обоснованной задачи по разработке средств контроля и методики учета и уменьшения несимметрии напряжения в сетях.

С целью мониторинга показателей качества электрической энергии в режиме реального времени, особенно связанных с искажением симметричности питающего напряжения, был разработан метод, позволяющий определять кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, вызванные искажением симметричности питающего напряжения. На основании данного метода был создан алгоритм и разработана программа для ЭВМ, позволяющая определять кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (K_{2U}) по значению коэффициента искажения синусоидальности питающего напряжения по обратной последовательности.

В основу разработки алгоритма расчета кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех заложены требования ГОСТ 32144-2013. При построении алгоритма учитывались предельные и нормально допустимые значения искажений синусоидальности питающего напряжения в зависимости от продолжительности периода наблюдений за параметрами электрической сети, производимых с помощью сертифицированных средств наблюдений.

Значение величины кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи K_{2U} определим по формуле:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}}, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31}^2)}$, U_{ijfund} — основная составляющая напряжения между фазами i и j .

С учетом теоремы непрерывности величина K_{2U} является непрерывно распределенной случайной величиной электрической сети, появление которой связано с множеством случайных событий. Эта величина непосредственно связана с полем событий, и ее можно описать следующей таблицей вероятностей:

$$\begin{pmatrix} K_{2U1}, & K_{2U2}, & K_{2U3}, & \dots, & K_{2Ui}, & \dots, & K_{2Un} \\ P_1, & P_2, & P_3, & \dots, & P_i, & \dots, & P_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $K_{2U1}, K_{2U2}, K_{2U3}, \dots, K_{2Ui}, \dots, K_{2Un}$ — значения коэффициента K_{2U} в течение расчетного времени, %; $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$ — вероятность появления этих значений.

Как видно из выражения (2), в случае, когда значение искомой величины (K_{2U}) превышает значения, регламентированные ГОСТ 32144–2013 как нормально допустимые, некоторая часть рассматриваемого поля событий свидетельствует о возникновении в рассматриваемой сети электромагнитной помехи, связанной с низкими частотами и распространяемой по проводам. Причиной ее возникновения может являться особенность технологии производственного процесса, способы передачи электроэнергии и ее распределения, особенности технических средств со стороны потребителя (рисунок 1) в исследуемых сетях общего назначения. Для определения действительного значения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи, возникшей в рассматриваемой сети, могут быть использованы только методы математической статистики.

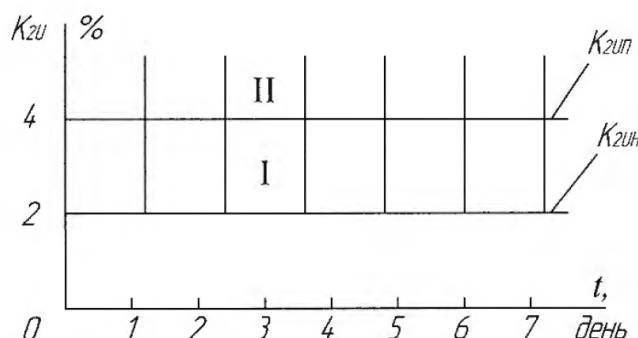


Рис. 1. Диаграмма области возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности

Процесс возникновения исследуемой помехи можно математически описать, воспользовавшись моделью

$$K_{2U} \left[\begin{matrix} P(K_{2U} < K_{2U} < K_{2U}) > 0,05; \\ P(K_{2U} < K_{2U} < \infty) \neq 0 \end{matrix} \right] \subseteq \delta K_{2U}, \quad (3)$$

где δK_{2U} — кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха по K_{2U} , %.

Проведенные с использованием формулы (2) расчеты показали, что если искомая вероятность величины K_{2U} превышает значение 0,05, то кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха находится в диапазоне $2 \div 4$ %, а при расчетном значении вероятности, превышающем 4 %, кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха принимает значение, отличное от нуля. Таким образом, о наличии кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи в исследуемой электрической сети можно судить, даже если выполняется только одно из приведенных выше условий.

Следовательно, можно констатировать, что использование системы уравнений (3) в исследовании электрической сети с искажением симметричности напряжений показывает наличие кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, если расчетная величина выходит за пределы значений, нормируемых ГОСТ.

Вероятность распределения случайной величины в промежутке между предельно допустимыми и нормально допустимыми значениями можно определить по формуле:

$$P(K_{2U} < K_{2U} < K_{2U}) = \int_2^4 \psi(K_{2U}) d(K_{2U}). \quad (4)$$

Для интервала $(K_{2U}; \infty)$ эта функция может быть представлена в следующем виде:

$$P(K_{2U} < K_{2U} < \infty) = \int_4^{\infty} \psi(K_{2U}) d(K_{2U}), \quad (5)$$

где $\psi(K_{2U})$ — плотность вероятности распределения величины K_{2U} , %.

По предложенному алгоритму расчета вероятности возникновения электромагнитной помехи, распространяемой по проводам и связанной с низкими частотами искажений питающего напряжения, разработана программа для персональных компьютеров «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности», которая получила свидетельство о государственной регистрации [1]. При создании программы для ЭВМ была использована система графического программирования LabVIEW, т. е. система программирования с помощью графических объектов, включающая в себя возможность синхронизации, обмена данными с внешними устройствами, управления и имеющая в своем составе множество библиотек математических функций, с помощью которых можно комплексно анализировать полученные данные, в том числе: во времени, по амплитуде, спектру, порядку и т. п. [2].

Одной из задач, решаемых в ходе разработки программы, являлась задача разработки такого дизайна диалоговых окон, который не требовал бы от пользователя программы специальных знаний программирования, что было реализовано с помощью системы программирования LabVIEW. При работе с программой нет необходимости вводить вручную значения, полученные при измерениях, так как многие применяемые в настоящее время измерительные устройства, такие как «Омск-М», обеспечивают формирование результатов изучения в широко используемом формате Excel [2].

При разработке программы использовались функциональные блок-схемы. Программа для ЭВМ способна функционировать во всех версиях операционной системы Windows и занимает объем оперативной памяти 210 Мб [1].

Как видно из блок-схемы программы, представленной на рисунке 2, в ней, кроме расчета вероятностей появления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, используется массив данных с нормируемыми ГОСТ 32144–2013 значениями показателей качества электроэнергии.

Панели пользователя максимально понятны и удобны для пользователя, не имеющего навыков программирования и глубоких знаний в сфере информатики. Они не перегружены лишней информацией, что значительно облегчает использование программы.

Достоинством разработанной программы является полная совместимость с программами Matlab (приложение Simulink), Mathcad, а также большое число виртуальных приборов и средств управления. Программа в автоматическом режиме производит необходимые вычисления и выводит полученные результаты в удобной для пользователя форме: в виде графиков, осциллограмм, гистограмм и т. п.

Для нормального функционирования программы необходимо установить ее на персональный компьютер, при этом не требуется установка полного пакета системы программирования LabVIEW, достаточно запустить файл setup.exe (установочный файл), и произойдет автоматическая распаковка и установка программы на компьютер. По окончании установки программы с помощью установочного файла она полностью готова к выполнению расчетов.

Для корректной работы программы необходимо использовать массив данных, полученный от сертифицированных и поверенных измерительно-вычислительных комплексов, например таких, как Ресурс-ПКЭ. В этом измерительно-вычислительном комплексе применяется математико-статистический способ анализа с использованием выборочной совокупности. Такой контроль может быть одноступенчатым и многоступенчатым, что значительно повышает точность выполняемого анализа.

При подготовке программы к работе необходимо экспортировать исходные данные в формате электронных таблиц Excel, после чего файл, содержащий данные измерений, сохраняют в текстовом

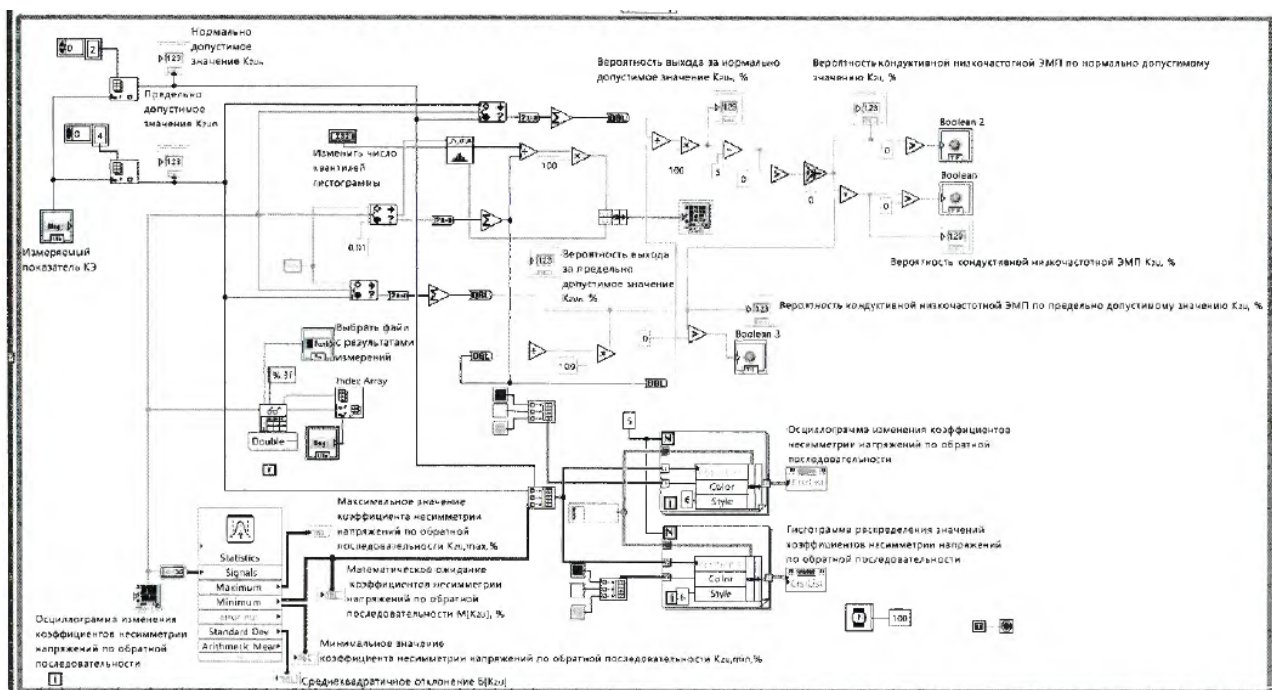


Рис. 2. Окно разработки программы с используемыми блок-схемами

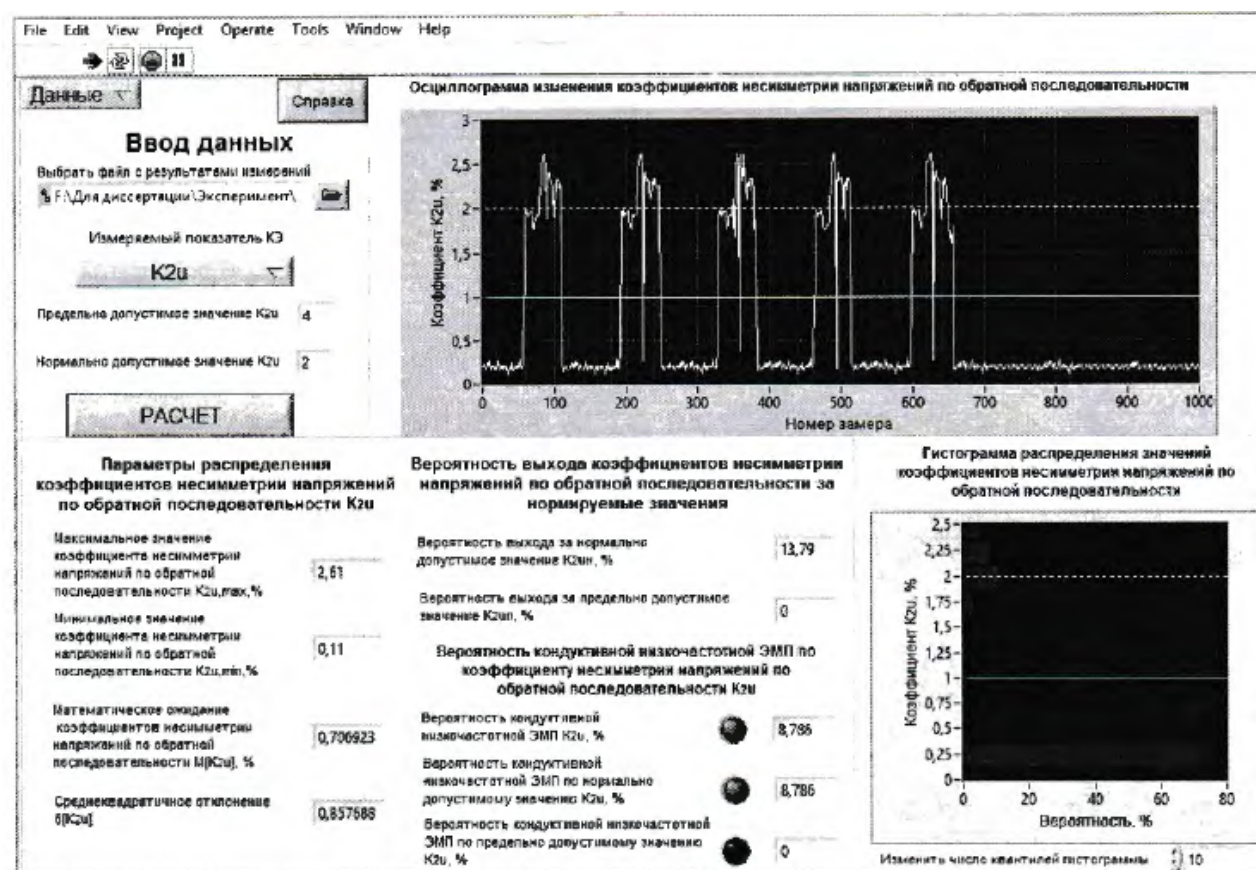


Рис. 3. Основное рабочее окно программы

формате с учетом разделителей табуляции, а затем вводят в программу через диалоговое окно «Ввод данных». Отличительной особенностью разработанной программы является то, что все необходимые нормативные значения внесены в отдельный массив данных.

Существенной особенностью разработанной программы является возможность представления

**Параметры распределения
коэффициентов несимметрии напряжений
по обратной последовательности K_{2u}**

Максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2u}, \max, \%$	2,63
Минимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2u}, \min, \%$	0,09
Математическое ожидание коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности $M[K_{2u}], \%$	0,955777
Среднеквадратичное отклонение $\sigma[K_{2u}]$	0,93954

Рис. 4. Окно расчета распределения значений δK_{2U} **Вероятность выхода коэффициентов несимметрии
напряжений по обратной последовательности за
нормируемые значения**

Вероятность выхода за нормально допустимое значение $K_{2u}, \%$	18,89
Вероятность выхода за предельно допустимое значение $K_{2u}, \%$	0
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2u}	
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП $K_{2u}, \%$	13,89
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по нормально допустимому значению $K_{2u}, \%$	13,89
Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по предельно допустимому значению $K_{2u}, \%$	0

Рис. 5. Окно расчета при отклонении δK_{2U} от нормируемых значений

результатов в виде гистограммы исследуемой величины. Для построения гистограммы необходимо ввести в диалоговое окно программы число квантилей, которое выбирается из условия равенства границы нормируемого ГОСТ значения показателя качества с границей квантиля. Количество квантилей определяется условием наименьшего значения для необходимой точности расчета.

После ввода исходных данных, представленных массивом, программа выполняет обработку полученных значений (рисунок 4), определяет основные параметры вероятности возникновения искомой величины (рисунок 5). В случае, когда вероятность появления δK_{2U} больше нормируемого значения, в диалоговом окне программы индикаторы диалогового окна обозначают отклонение от параметров ГОСТ красным цветом.

Массив данных может быть представлен как в виде осциллограммы (рисунок 6), так и в виде гистограммы.

**Рис. 6.** Пример представления массива данных в виде осциллограммы

Необходимый способ представления массива данных может быть определен после вычисления измерительно-вычислительным комплексом закона распределения δK_{2U} как случайной величины.

Разработанная программа позволяет автоматически определять δK_{2U} , что сопровождается затруднениями при работе в таких программах, как Mathcad, Matrix, Matlab и аналогичных.

Представленная программа является базой метода определения электромагнитных помех, распространяющихся по проводам и связанных с низкими частотами, как составляющая концепции Smart Grid (рисунок 7).

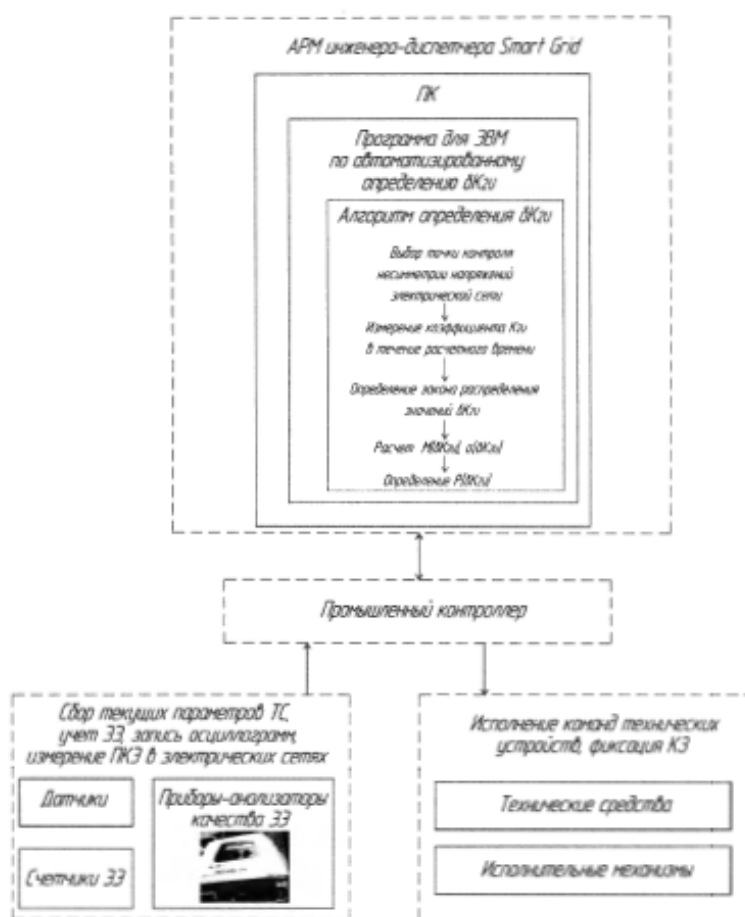


Рис. 7. Функциональная интерпретация метода автоматизированного определения δK_{2U}

В технологии Smart Grid применяются новые методы управления, современные технологии и компоненты электрических сетей, методы поддержки принятия решений, интегрированные коммуникации. Основным требованием при использовании этой технологии являются высокие требования к обеспечению нормированных значений показателей качества электрической энергии [3].

Следовательно, данный метод, на базе которого составлены алгоритм и программа для ЭВМ, согласно основным положениям концепции «Интеллектуальные сети», можно представить как новый способ обработки исходных данных, что обеспечивает научное обоснование оценки электромагнитной обстановки в рассматриваемых сетях, и использовать необходимые технические средства и решения для незамедлительного подавления помех в случае их появления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. *Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности*: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23380. М.: ИУО РАО ОФЭРНиО; 2017.
2. Зубанов Д. А., Клеутин В. И., Сидоренко А. А. и др. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы LabVIEW. *Сборник научных трудов ОИВТ*. 2012;10:118–122.
3. Ушаков В. Я. *Современные проблемы электроэнергетики*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 448 с.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 28.12.2022.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 9,7. Уч.-изд. л. 14,3.

Цена свободная.