

ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2024
T. 5 № 3

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 5
№ 3**

**Vol. 5
No. 3**

Москва
2024

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, вице-президент, Российская академия наук; заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

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, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., заместитель директора Федерального научного центра

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

Земпо 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.

Технические редакторы

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

Бобровская Ольга Павловна

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), Vice President, Russian Academy of Sciences (RAS), 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. Iakovovski*, 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*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director, Federal Research Center

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, Yurga 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. *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 Editors

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

Olga P. Bobrovskaya

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

А. А. Злотник, Т. А. Ломоносов	
О свойствах полуявной векторной компактной схемы для акустического волнового уравнения	6
Г. В. Смирнов, Н. В. Замятин	
Нейронная сеть для контроля изоляции обмоток электротехнических изделий в процессе операции их намотки	13
И. М. Клемышев, С. М. Колчин, С. С. Лебедев, С. О. Старков	
Автономная многокурсовая нейросетевая система компьютерного зрения для автоматизации контроля ручных операций	24
М. П. Базилевский	
Моделирование тенденций временных рядов со структурными изменениями с помощью многослойных модульных регрессий	34
А. Р. Шахмаева, С. У. Увайсов, Э. Казалиева	
Математическое моделирование теплофизических процессов при формировании контакта к основанию корпуса полупроводникового прибора	42
В. М. Еськов, М. А. Филатов, Т. В. Воронюк, Е. Г. Мельникова, А. Ю. Кухарева	
Проблема необратимости в квантовой механике и в живых системах	50
Б. А. Богатых	
Фрактально-голографическая процессуальность в развитии природы сознания	56

CONTENTS

A. A. Zlotnik, T. A. Lomonosov	
On Properties of a Semi-Explicit Vector Compact Scheme for the Acoustic Wave Equation	6
G. V. Smirnov, N. V. Zamyatin	
A Neural Network for Monitoring Insulation During Coil Winding	13
I. M. Klemyshev, S. M. Kolchin, S. S. Lebedev, S. O. Starkov	
Autonomous Multi-Camera Neural Network Computer Vision System for Manual Operation Monitoring	24
M. P. Bazilevskiy	
Modeling Time Series Trends with Structural Changes using Multilayer Modular Regressions	34
A. R. Shakhmaeva, S. U. Uvaysov, E. Kazalieva	
Simulation of Thermophysical Processes During the Manufacturing of a Semiconductor Device Housing Contact	42
V. M. Eskov, M. A. Filatov, T. V. Voronyuk, E. G. Melnikova, A. Yu. Kukhareva	
The Problem of Irreversibility in Quantum Mechanics and Living Systems	50
B. A. Bogatykh	
Fractal-Holographic Procedurality and the Nature of Consciousness	56

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-01

**О СВОЙСТВАХ ПОЛУЯВНОЙ ВЕКТОРНОЙ КОМПАКТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ
АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ****А. А. Злотник^а, Т. А. Ломоносов^б***НИУ Высшая школа экономики, г. Москва, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2440-2816>, azlotnik@hse.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3262-5772>, tlomonosov@hse.ru

Аннотация: начально-краевая задача для n -мерного акустического волнового уравнения, $n \geq 1$, с переменной скоростью звука и неоднородным краевым условием Дирихле решается численно. С этой целью изучается нестандартная трехслойная полуявная по времени компактная схема. Схема является трехточечной по каждому пространственному направлению и использует n вспомогательных иско- мых функций, аппроксимирующих несмешанные вторые пространственные производные решения. На первом слое по времени применяется аналогичная двухслойная по времени схема, где производные данных не используются. Для реализации схемы требуется только решение систем с трехдиагональ- ными матрицами по всем n пространственным направлениям. Даны теоремы об условной устойчивости схемы в расширенной энергетической норме и об оценке погрешности 4-го порядка в этой норме. Приведены результаты 3D численного эксперимента, в котором погрешность схемы убывает с 4-м порядком и очень мала уже на грубой сетке.

Ключевые слова: акустическое волновое уравнение, полуявная трехслойная векторная схема, компактная схема 4-го порядка точности, условная устойчивость, оценка погрешности.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РНФ, проект 23-21-00061.

Для цитирования: Злотник А. А., Ломоносов Т. А. О свойствах полуявной векторной ком- пактной схемы для акустического волнового уравнения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):6–12. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-01.

Поступила в редакцию: 23.07.2024.

В окончательном варианте: 16.08.2024.

**ON PROPERTIES OF A SEMI-EXPLICIT VECTOR COMPACT SCHEME FOR THE
ACOUSTIC WAVE EQUATION****A. A. Zlotnik^a, T. A. Lomonosov^b***Higher School of Economics University, Moscow, Russian Federation*^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2440-2816>, azlotnik@hse.ru^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3262-5772>, tlomonosov@hse.ru

Abstract: we numerically solved an initial-boundary value problem for the n -dimensional acoustic wave equation ($n \geq 1$) with variable sound speed and nonhomogeneous Dirichlet boundary conditions. We studied a non-standard, three-level, semi-explicit compact scheme. The scheme uses three points per spatial direction and exploits n auxiliary functions to approximate second-order non-mixed spatial derivatives. At the first time level, we applied a two-level scheme without using data derivatives. The scheme involves solving tridiagonal matrix systems in all n spatial directions. We proved theorems on conditional stability and 4th-order error bounds. Our 3D experiments confirmed 4th-order accuracy with minimal error, even on coarse meshes.

Keywords: acoustic wave equation, semi-explicit three-level vector scheme, compact scheme of the 4-th order of accuracy, conditional stability, error bound.

Acknowledgements: the paper is supported by the RSF, project no. 23-21-00061.

Cite this article: Zlotnik A. A., Lomonosov T. A. On Properties of a Semi-Explicit Vector Com- pact Scheme for the Acoustic Wave Equation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):6–12. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-01.

Original article submitted: 23.07.2024.

Revision submitted: 16.08.2024.

Введение

В данной статье продолжается изучение трехслойной полуявной по времени векторной компактной разностной схемы 4-го порядка для n -мерного акустического волнового уравнения с переменной скоростью звука, $n \geq 1$, недавно построенной и исследованной в [1, 2]. В ней нестандартным является введение дополнительных искомым функций, аппроксимирующих несмешанные вторые пространственные производные решения, что приводит к простой прямой реализации схемы (без применения итерационных методов). На первом слое по времени применяется двухслойная аппроксимация по времени, аналогичная основным уравнениям схемы, без использования производных данных (в отличие от многих других работ). Условная устойчивость такой схемы в сильной энергетической норме и оценка погрешности порядка 3.5 в ней были выведены в [2]. При постоянной скорости звука устойчивость в стандартной энергетической норме и оценка погрешности 4-го порядка в ней также были доказаны, но доказательство не обобщается на случай переменной скорости звука. Отметим, что анализ устойчивости не так прост, поскольку исходная форма полуявной схемы не является самосопряженной.

Здесь применяется другой, более тонкий подход, основанный на теореме устойчивости в расширенной слабой энергетической норме для абстрактного трехслойного метода и симметризации изучаемой схемы. Он позволил доказать устойчивость в расширенной стандартной энергетической норме (без условия малости шагов сетки) и оценку погрешности 4-го порядка в ней. Также в дополнение к 2D численным экспериментам в [2] приводится 3D эксперимент, где и на практике погрешность схемы убывает с 4-м порядком и очень мала уже на грубых сетках для решений типа гладкой бегущей волны.

Полуявная векторная компактная схема была первоначально предложена для двумерного волнового уравнения в [3]. Также случай $n = 3$ был рассмотрен в [4], где для акустического волнового уравнения была применена отличная от нашей пространственная аппроксимация; для нее строгое обоснование устойчивости и вывод оценок 4-го порядка отсутствуют и представляются громоздкими задачами, в особенности без требования малости шагов сетки. Упомянем, что случай $n \geq 4$ представляет интерес в теоретической физике.

Разработка более стандартных компактных трехслойных схем 4-го порядка была начата гораздо раньше, и им посвящена обширная литература, в случае $n = 3$ см., в частности [5–9]. Но для схем такого типа для акустического волнового уравнения строгие теоремы устойчивости и оценки погрешности 4-го порядка были доказаны лишь недавно в [9]. Их эффективная реализация требует применения итерационных методов, что приводит к увеличению вычислительных затрат.

Естественным способом отказа от итерационных методов явился переход к экономичным методам типа переменных направлений (МПН), в случае $n = 3$ схемы 4-го порядка этого типа см., в частности, в [8, 10–13] и, в случае акустического волнового уравнения — в [14, 15]. Как и для изучаемого в статье метода, для их реализации необходимо решать только одномерные системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональными матрицами. Однако для акустического волнового уравнения строгих теорем устойчивости и оценок погрешности 4-го порядка для МПН методов нет, т.к. их вывод сталкивается с существенными трудностями. Заметим, что неявность и условная устойчивость присущи всем перечисленным выше трем типам компактных схем 4-го порядка. Для волнового уравнения разработано также много иных численных методов повышенного порядка аппроксимации, на которых здесь мы не будем останавливаться.

Статья организована следующим образом. Сначала выписана начально-краевая задача для акустического волнового уравнения, и для удобства кратко напомним построение полуявной векторной компактной схемы решения этой задачи и ее быстрая прямая реализация. Затем для этой схемы сформулированы теорема устойчивости в расширенной энергетической норме и соответствующая теорема об оценке погрешности 4-го порядка. В заключение приведен пример 3D расчета, подтверждающего, что погрешность схемы убывает с 4-м порядком и очень мала.

Многомерное акустическое волновое уравнение и полуявная 4-го порядка векторная компактная схема для его численного решения

Рассмотрим начально-краевую задачу для n -мерного акустического волнового уравнения

$$\rho(x)\partial_t^2 u(x,t) - Lu(x,t) = f(x,t), \quad L := a_1^2 \partial_1^2 + \dots + a_n^2 \partial_n^2, \quad \text{в } Q_T := \Omega \times (0,T); \quad (1)$$

$$u|_{\Gamma_T} = g(x, t); \quad u|_{t=0} = u_0(x), \quad \partial_t u|_{t=0} = u_1(x), \quad x \in \Omega := (0, X_1) \times \dots \times (0, X_n), \quad (2)$$

при неоднородном краевом условии Дирихле. Здесь $0 < \underline{\rho} \leq \rho(x) \leq \bar{\rho}$, а $a_1 > 0, \dots, a_n > 0$ — постоянные (они берутся разными, как и в [2, 8, 9]), $x = (x_1, \dots, x_n)$, $n \geq 1$. Также $\partial\Omega$ — граница Ω , а $\Gamma_T = \partial\Omega \times (0, T)$ — боковая поверхность Q_T . Функции ρ и u предполагаются гладкими.

Введем равномерную сетку $\bar{\omega}_{h_t}$ с узлами $t_m = mh_t$, $0 \leq m \leq M$ и шагом $h_t = T/M > 0$ на $[0, T]$; здесь $M \geq 2$. Пусть $\omega_{h_t} = \{t_m\}_{m=1}^{M-1}$. Определим сеточное среднее, разностные операторы и оператор суммирования по времени с переменным верхним пределом

$$\bar{s}_t y = \frac{1}{2}(\check{y} + y), \quad \bar{\delta}_t y = \frac{y - \check{y}}{h_t}, \quad \delta_t y = \frac{\hat{y} - y}{h_t}, \quad \Lambda_t y = \delta_t \bar{\delta}_t y = \frac{\hat{y} - 2y + \check{y}}{h_t^2}, \quad I_{h_t}^m y = h_t \sum_{l=1}^m y^l$$

при $1 \leq m \leq M$ и также $I_{h_t}^0 y = 0$, где $y^m = y(t_m)$, $\check{y}^m = y^{m-1}$, $\hat{y}^m = y^{m+1}$.

Введем равномерную сетку $\bar{\omega}_{h_k}$ с узлами $x_{ki} = ih_k$, $0 \leq i \leq N_k$ и шагом $h_k = X_k/N_k$ по x_k . Пусть $\omega_{h_k} = \{x_{ki}\}_{i=1}^{N_k-1}$. Определим на ω_{h_k} разностный аналог ∂_k^2 и среднее по Нумерову по x_k :

$$(\Lambda_k w)_i := \frac{1}{h_k^2}(w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}), \quad s_{kN} w_i := \frac{1}{12}(w_{i-1} + 10w_i + w_{i+1}) = (I + \frac{1}{12}h_k^2 \Lambda_k)w_i,$$

где $w_i = w(x_{ki})$.

Далее, введем прямоугольную сетку $\bar{\omega}_h = \bar{\omega}_{h_1} \times \dots \times \bar{\omega}_{h_n}$ в $\bar{\Omega}$, где $h = (h_1, \dots, h_n)$. Пусть $\omega_h = \omega_{h_1} \times \dots \times \omega_{h_n}$ и $\partial\omega_h = \bar{\omega}_h \setminus \omega_h$. Определим сетки $\omega_h := \omega_h \times \omega_{h_t}$ в Q_T и $\partial\omega_h = \partial\omega_h \times \{t_m\}_{m=1}^M$ на $\bar{\Gamma}_T$, с $\mathbf{h} = (h, h_t)$.

Пусть H_h — евклидово пространство функций со скалярным произведением $(v, w)_h$ и нормой $\|w\|_h = (w, w)_h^{1/2}$. Любой линейный оператор $C_h = C_h^* > 0$, действующий в H_h , порождает норму $\|w\|_{C_h} := (C_h w, w)_h^{1/2} = \|C_h^{1/2} w\|_h$ в H_h . Ниже везде (кроме леммы 1) H_h — пространство функций на $\bar{\omega}_h$, равных 0 на $\partial\omega_h$, со скалярным произведением L^2 -типа

$$(v, w)_h = h_1 \dots h_n \sum_{x_i \in \omega_h} v(x_i)w(x_i), \quad x_i = (i_1 h_1, \dots, i_n h_n), \quad \mathbf{i} = (i_1, \dots, i_n).$$

Введем простейшую разностную аппроксимацию $L_h := a_1^2 \Lambda_1 + \dots + a_n^2 \Lambda_n$ для L . Как известно,

$$\frac{4}{X_k^2} I < -\Lambda_k = -\Lambda_k^* < \frac{4}{h_k^2} I, \quad \frac{2}{3} I < s_{kN} = s_{kN}^* < I, \quad 0 < -L_h = -L_h^* < 4\left(\frac{a_1^2}{h_1^2} + \dots + \frac{a_n^2}{h_n^2}\right) I.$$

Здесь и ниже все операторные неравенства относятся к самосопряженным операторам в H_h , а I — единичный оператор.

Кратко напомним вывод изучаемого метода. Сначала формально заменим уравнение (1) системой уравнений со вторыми частными производными по t или x_k :

$$\rho(x) \partial_t^2 u(x, t) - (a_1^2 u_{11}(x, t) + \dots + a_n^2 u_{nn}(x, t)) = f(x, t), \quad u_{kk}(x, t) := \partial_k^2 u(x, t), \quad 1 \leq k \leq n, \quad \text{в } Q_T, \quad (3)$$

где $u_{11}, \dots, u_{nn}$ — дополнительные искомые функции. Дифференцирование уравнения (1) по t дает

$$\rho \partial_t^4 u = \partial_t^2 (Lu + f) = L\left[\frac{1}{\rho}(Lu + f)\right] + \partial_t^2 f.$$

Поэтому можно выполнить последовательные преобразования

$$\begin{aligned} \rho \Lambda_t u &= \rho \partial_t^2 u + \frac{1}{12} h_t^2 \rho \partial_t^4 u + \mathcal{O}(h_t^4) = \left(\rho I + \frac{1}{12} h_t^2 L\right) \left(\frac{1}{\rho} Lu\right) + f + \frac{1}{12} h_t^2 (\partial_t^2 f + L \frac{f}{\rho}) + \mathcal{O}(h_t^4) \\ &= \left(\rho I + \frac{1}{12} h_t^2 L_h\right) \frac{1}{\rho} (a_1^2 u_{11} + \dots + a_n^2 u_{nn}) + f_h + \mathcal{O}(|\mathbf{h}|^4), \quad \text{с } f_h := f + \frac{1}{12} h_t^2 (\Lambda_t f + L_h \frac{f}{\rho}). \end{aligned}$$

Далее, поскольку вспомогательное второе уравнение в (3) — обыкновенное дифференциальное уравнение по x_k , то его хорошо известная аппроксимация Нумерова приводит к формуле $s_{kN} u_{kk} - \Lambda_k u = \mathcal{O}(h_k^4)$ на ω_h , $1 \leq k \leq n$.

Если опустить остаточные члены в последних двух разложениях, то получится *трехслойная полуявная векторная компактная схема*

$$\rho \Lambda_t v - \left(\rho I + \frac{1}{12} h_t^2 L_h\right) \frac{1}{\rho} (a_1^2 v_{11} + \dots + a_n^2 v_{nn}) = f_h, \quad s_{kN} v_{kk} = \Lambda_k v \quad \text{на } \omega_h, \quad 1 \leq k \leq n, \quad (4)$$

с основной искомой функцией $v \approx u$, определенной на $\bar{\omega}_h \times \bar{\omega}_{h_t}$, и вспомогательными функциями $v_{11} \approx u_{11}, \dots, v_{nn} \approx u_{nn}$, определенными на $\bar{\omega}_h \times \omega_{h_t}$. Набор этих функций составляет искомую вектор-функцию.

Эта схема дополняется сеточными краевыми условиями

$$v|_{\partial\omega_h} = g, \quad a_k^2 v_{kk}|_{\partial\omega_h} = g_k, \quad 1 \leq k \leq n, \quad (5)$$

в соответствии с краевым условием $u|_{\Gamma_T} = g$ и акустическим волновым уравнением в $\bar{Q}_T$:

$$g_k = \rho \partial_t^2 g - \sum_{1 \leq l \leq n, l \neq k} a_l^2 \partial_l^2 g - f \quad \text{при } x_k = 0, X_k, \quad g_k = a_k^2 \partial_k^2 g \quad \text{при } x_l = 0, X_l, \quad 1 \leq l \leq n, l \neq k,$$

на частях Γ_T . При $g = 0$ правые части этих формул равны соответственно $-f$ и 0.

Кроме того, должна быть задана функция $v^m|_{m=1}$ с 4-м порядком аппроксимации. Часто это делается явным образом с использованием формулы Тейлора и волнового уравнения, см., например, [3, 4, 7, 10]. Эти громоздкие формулы используют производные высшего порядка u_0 и u_1 ; они неприменимы при негладких u_0 и u_1 . Вместо этого, следуя [2, 9], построим уравнение для v^1 , аналогичное основным уравнениям схемы (4):

$$\rho(\delta_t v)^0 = \frac{1}{2} h_t (\rho I + \frac{1}{12} h_t^2 L_h) \frac{1}{\rho} (a_1^2 v_{11}^0 + \dots + a_n^2 v_{nn}^0) + u_{1h} + \frac{1}{2} h_t f_h^0, \quad s_{kN} v_{kk}^0 = \Lambda_k v^0 \quad \text{на } \omega_h, \quad (6)$$

где $1 \leq k \leq n$ и используются специальные $u_{1h} \approx \rho u_1$ и $f_h^0 \approx f_0 = f|_{t=0}$ такие, что

$$u_{1h} := (\rho I + \frac{1}{6} h_t^2 L_h) u_1, \quad f_h^0 := f_{dh_t}^{(0)} + \frac{1}{12} h_t^2 L_h \frac{f_0}{\rho} \quad \text{на } \omega_h, \\ f_{dh_t}^{(0)} = \frac{7}{12} f^0 + \frac{1}{2} f^1 - \frac{1}{12} f^2 \quad \text{или} \quad f_{dh_t}^{(0)} = \frac{1}{3} f^0 + \frac{2}{3} f^{1/2}, \quad \text{с } f^{1/2} := f|_{t=h_t/2}.$$

Значения v_{kk}^0 на $\partial\omega_h$ могут быть взяты как в (5) (или, для гладкой u_0 , с использованием $\partial_k^2 u_0$ на $\partial\Omega$). Благодаря этим формулам погрешность первого уравнения (6) имеет 4-й порядок

$$\hat{\psi}^0 := \rho(\delta_t u)^0 - \frac{1}{2} h_t (\rho I + \frac{1}{12} h_t^2 L_h) \frac{1}{\rho} (a_1^2 u_{110} + \dots + a_n^2 u_{nn0}) - u_{1h} - \frac{1}{2} h_t f_h^0 = \mathcal{O}(|h|^4) \quad \text{на } \omega_h,$$

см. [2], где $|h|^4 = |h|^4 + h_t^4$. Здесь и ниже $y_0 := y|_{t=0}$ для любой зависящей от t функции y .

Построенная схема является полуявной по времени. Функция v^{m+1} находится явно на ω_h из первых уравнений (4) при $1 \leq m \leq M-1$ и (6) при $m=0$, когда вспомогательные функции $v_{11}^m, \dots, v_{nn}^m$ известны на $\bar{\omega}_h$. А эти функции вычисляются из простых одномерных трехточечных разностных вторых уравнений (4) при $1 \leq m \leq M-1$ и (6) при $m=0$ в совокупности с краевыми условиями в (5), где v^m задана. Тем самым существует определенная аналогия с МПН-методами в характере реализации схемы. С другой стороны, функции $v_{11}^m, \dots, v_{nn}^m$ независимы и допускают многопоточное вычисление (реализованное в наших вычислениях), и можно хранить только их взвешенную сумму для экономии памяти компьютера.

Устойчивость и оценки погрешности 4-го порядка в энергетической норме

Начнем со вспомогательного общего результата об устойчивости в слабой энергетической норме и его следствии, вытекающего из [8].

Лемма 1. Рассмотрим абстрактную трехслойную схему

$$B_h \Lambda_t v + A_h v = \varphi \quad \text{в } H_h \quad \text{на } \omega_{h_t}, \quad B_h (\delta_t v)^0 + \frac{1}{2} h_t A_h v^0 = u^{(1)} + \frac{1}{2} h_t \varphi^0 \quad \text{в } H_h$$

для функции $v: \bar{\omega}_{h_t} \rightarrow H_h$. Здесь $B_h = B_h^* > 0$ и $A_h = A_h^* > 0$ — линейные операторы, действующие в евклидовом пространстве H_h и такие, что $\frac{1}{4} h_t^2 A_h \leq (1 - \varepsilon_0^2) B_h$ при некотором $0 < \varepsilon_0 < 1$. Верны оценки, выражающие устойчивость в слабой энергетической норме и ее следствие

$$\max_{0 \leq m \leq M} \max \{ \varepsilon_0 \|v^m\|_{B_h}, \|I_{h_t}^m \bar{s}_t v\|_{A_h} \} \leq \|v^0\|_{B_h} + 2 \|A_h^{-1/2} u^{(1)}\|_h + 2 \|A_h^{-1/2} \varphi\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)}, \\ \varepsilon_0 \max_{1 \leq m \leq M} \|A_h^{-1/2} B_h \bar{\delta}_t v\|_h \leq (1 + \varepsilon_0) \|v^0\|_{B_h} + (3 + 2\varepsilon_0) (\|A_h^{-1/2} u^{(1)}\|_h + \|A_h^{-1/2} \varphi\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)}).$$

Здесь стоит норма $\|y\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)} := \frac{1}{2} h_t \|y^0\|_h + h_t \sum_{m=1}^{M-1} \|y^m\|_h$ для функций $y: \{t_m\}_{m=0}^{M-1} \rightarrow H_h$.

Замечание 1. Верна дополнительная оценка (без оператора усреднения $\bar{s}_t$)

$$\varepsilon_0 \max_{0 \leq m \leq M} \|I_{h_t}^m v\|_{A_h} \leq (2 + 2\varepsilon_0) (\|v^0\|_{B_h} + \|A_h^{-1/2} u^{(1)}\|_h + \|A_h^{-1/2} \varphi\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)}).$$

Введем неоднородную версию вторых уравнений (4), (6):

$$s_{kN} v_{kk}^m = \Lambda_k v^m + b_k^m \text{ на } \omega_h, \quad 0 \leq m \leq M-1, \quad 1 \leq k \leq n, \quad (7)$$

с заданными функциями $b_1, \dots, b_n$. В практике вычислений не бывает $b_1 = \dots = b_n = 0$ из-за ошибок округления, поэтому необходимо изучить влияние $b_1, \dots, b_n$ на v . Это также необходимо для вывода оценок погрешности.

Введем два самосопряженных оператора в H_h :

$$E_h := -(a_1^2 s_{1N}^{-1} \Lambda_1 + \dots + a_n^2 s_{nN}^{-1} \Lambda_n), \quad I_{\rho h} := \frac{1}{\rho} I + \frac{1}{12} h_t^2 \left(\frac{1}{\rho} L_h \right) \frac{1}{\rho} I.$$

Справедливы неравенства $-L_h < E_h < -(3/2)L_h$ и $I_{\rho h} = I_{\rho h}^* < \rho^{-1} I \leq \underline{\rho}^{-1} I$.

Введем первое условие на h_t и $h_1, \dots, h_n$:

$$\frac{1}{3} h_t^2 \left(\frac{a_1^2}{h_1^2} + \dots + \frac{a_n^2}{h_n^2} \right) \leq (1 - \varepsilon) \underline{\rho} \text{ при некотором } 0 < \varepsilon < 1. \quad (8)$$

С его помощью можно оценить $I_{\rho h}$ снизу и вывести двусторонние оценки

$$\varepsilon \frac{1}{\bar{\rho}} I \leq \varepsilon \frac{1}{\rho} I < I_{\rho h} < \frac{1}{\rho} I \leq \frac{1}{\underline{\rho}} I \Leftrightarrow \underline{\rho} \leq \rho I < I_{\rho h}^{-1} < \varepsilon^{-1} \rho I \leq \varepsilon^{-1} \bar{\rho} I.$$

С помощью леммы 1., исключения $v_{11}, \dots, v_{nn}$ и надлежащей симметризации выводится новый результат об условной устойчивости полуявного векторного компактного метода.

Теорема 1. Пусть выполнены условия (8) и

$$\frac{1}{4} h_t^2 E_h \leq (1 - \varepsilon_0^2) \underline{\rho} I \text{ при некотором } 0 < \varepsilon_0 < 1, \quad (9)$$

а $g = g_1 = \dots = g_n = 0$ в краевых условиях (5). Тогда для обобщенной схемы (4)-(6) (см. (7)) верны оценки, выражающие устойчивость схемы в расширенной энергетической норме

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq m \leq M} \max \{ \varepsilon_0 \|v^m\|_{E_h}, \|I_{h_t}^m \bar{s}_t E_h v\|_{I_{\rho h}} \} &\leq \|v^0\|_{E_h} + 2 \left\| \frac{1}{\rho} u_{1h} \right\|_{I_{\rho h}^{-1}} + 2 \left\| I_{\rho h}^{-1/2} \left[\frac{1}{\rho} (f_h + \beta_h) \right] \right\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)}, \\ \varepsilon_0 \max_{1 \leq m \leq M} \|\bar{\delta}_t v^m\|_{I_{\rho h}^{-1}} &\leq (1 + \varepsilon_0) \|v^0\|_{E_h} + (3 + 2\varepsilon_0) \left(\left\| \frac{1}{\rho} u_{1h} \right\|_{I_{\rho h}^{-1}} + \left\| I_{\rho h}^{-1/2} \left[\frac{1}{\rho} (f_h + \beta_h) \right] \right\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)} \right), \end{aligned}$$

при любых функциях $f_h, b_1, \dots, b_n$: $\{t_m\}_{m=0}^{M-1} \rightarrow H_h$ и $v^0, u_{1h} \in H_h$ (поэтому здесь f_h и u_{1h} — не только функции, определенные выше) и

$$\beta_h^m := \rho I_{\rho h} (a_1^2 s_{1N}^{-1} b_1^m + \dots + a_n^2 s_{nN}^{-1} b_n^m) \text{ в } H_h, \quad 0 \leq m \leq M-1.$$

Поскольку $E_h < \frac{3}{2}(-L_h)$ в H_h , то оба условия устойчивости (8) и (9) выполнены при

$$h_t^2 \left(\frac{a_1^2}{h_1^2} + \dots + \frac{a_n^2}{h_n^2} \right) \leq \min \{ 3(1 - \varepsilon), \frac{2}{3}(1 - \varepsilon_0^2) \} \underline{\rho}.$$

При $0 < \varepsilon \leq 7/9$ это условие только в 1.5 раза жестче, чем аналогичное условие для стандартной явной трехслойной схемы 2-го порядка точности. Множитель 1.5 — оценка нормы операторов s_{kN}^{-1} .

Правые и левые части указанных в теореме оценок можно упростить следующим образом

$$\begin{aligned} \left\| I_{\rho h}^{-1/2} \left[\frac{1}{\rho} (f_h + \beta_h) \right] \right\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)} &\leq \underline{\rho}^{-1/2} \left(\varepsilon^{-1/2} \|f_h\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)} + \frac{3}{2} \max_{1 \leq k \leq n} a_k^2 \sum_{k=1}^n \|b_k\|_{\bar{L}_{h_t}^1(H_h)} \right), \\ \left\| \frac{1}{\rho} u_{1h} \right\|_{I_{\rho h}^{-1}} &= \left\| I_{\rho h}^{-1/2} \left(\frac{1}{\rho} u_{1h} \right) \right\|_h \leq (\varepsilon \underline{\rho})^{-1/2} \|u_{1h}\|_h, \quad \underline{\rho}^{1/2} \|\bar{\delta}_t v^m\|_h \leq \|\bar{\delta}_t v^m\|_{I_{\rho h}^{-1}}. \end{aligned}$$

Для $w \in H_h$ введем $\|w\|_{H_h^1} := \|w\|_{-L_h} = (-L_h w, w)_h^{1/2}$ — сеточный аналог нормы в подпространстве Соболева $H_0^1(\Omega)$. Введем также энергетическую норму $\|y\|_{\varepsilon_h} := (\|\bar{\delta}_t y\|_h^2 + \|y\|_{H_h^1}^2)^{1/2}$.

Следующая теорема выводится на основе теоремы устойчивости 1.. Подчеркнем, что в ней g и $f|_{\Gamma_T}$ — произвольные (а не только нулевые).

Теорема 2. Пусть выполнены условия (8), (9), и $v^0 = u^0$ на $\bar{\omega}_h$. Тогда для схемы (4)–(6) верны оценка погрешности $u - v$ в расширенной энергетической норме и оценки погрешности $\partial_k^2 u - v_{kk}$ в более слабых “негативных” нормах

$$\sqrt{\varepsilon}\varepsilon_0 \max_{1 \leq m \leq M} (\|\bar{\delta}_t(u - v)^m\|_h + \|(u - v)^m\|_{H_h^1} + \sqrt{\varepsilon}\|I_{h_t}^m L_h(u - v)\|_h) = \mathcal{O}(|h|^4),$$

$$\sqrt{\varepsilon}\varepsilon_0 \max_{1 \leq k \leq n} \max_{0 \leq m \leq M-1} \|(-\Lambda_k)^{-1/2}(\partial_k^2 u^m - v_{kk}^m)\|_h = \mathcal{O}(|h|^4).$$

Здесь величины $\mathcal{O}(|h|^4)$ не зависят от ε и ε_0 .

Численный эксперимент в случае трех пространственных переменных

Рассмотрим погрешность $e(h, h_t)$ некоторой схемы в выбранной норме при $h_1 = \dots = h_n = h$ и предположим, что ее скорость сходимости равна $p > 0$ как по h , так и по h_t , т.е. $e(h, h_t) = c_1 h^p + c_2 h_t^p$ с некоторыми $c_1 > 0$ и $c_2 > 0$. Тогда при некотором $q > 1$ получим $e(h/q, h_t/q) = e(h, h_t)/q^p$ и искомое p можно найти по известной формуле типа Рунге

$$p = p_e = \ln \frac{e(h, h_t)}{e(h/q, h_t/q)} / \ln q.$$

Разумеется, эта практическая формула дает приближенный результат, но с уменьшением h и h_t ее точность растет, пока погрешность не становится столь мала, что начинает играть роль вычислительная погрешность. Выберем $q = 5/3$ меньше наиболее стандартного $q = 2$, что позволяет сократить вычислительные затраты более чем вдвое, т.к. $(5/3)^4 \approx 7.72$, а $2^4 = 16$.

Пусть $a_k = 1$ (даже в случае переменной скорости звука в отличие от [4]), область $\Omega = (0, 1)^3$ — куб, а сетка — кубическая с $N_k = N$, т.е. с $h_k = h = 1/N$, где $k = 1, 2, 3$. Пусть $T = 0.5$. Возьмем переменный коэффициент $\rho(x) = \sqrt{3}(1 + \cos^2 2\pi x_1 \cdot \cos^2 2\pi x_2 \cdot \cos^2 2\pi x_3)$ ($1/\rho(x)$ — квадрат скорости звука) с $\underline{\rho} = \sqrt{3}$ и точное гладкое решение типа бегущей волны

$$u(x, t) = \cos(t - x_1 - x_2 - x_3).$$

Данные f , u_0 , u_1 и g задаются в соответствии с ним, и все они отличны от тождественного нуля.

Значения $N = 81, 135, 225, 375$ и $M = 54, 90, 150, 250$ выбираем так, чтобы отношение последовательных значений как N , так и M было постоянным и равным $q = 5/3$.

Программный код схемы написан на языке Pure C для 64-битной архитектуры. Используется компьютер с 6-ядерным процессором AMD[©] Ryzen[©] 5 7600X и 64 ГБ оперативной памяти. Результаты вычислений даны в таблице 1. Ее столбцы содержат погрешности $e_{L_h^2}$ в $H_h = L_h^2$ -норме, $e_{H_h^1}$ в H_h^1 -норме, $e_{\mathcal{E}_h}$ в $\mathcal{E}_h$ -норме, все взятые в конечный момент времени $t = T$, и соответствующие порядки $p_{L_h^2}$, $p_{H_h^1}$, $p_{\mathcal{E}_h}$. Для схемы 4-го порядка все погрешности очень малы даже для самой грубой сетки с $N = 81$, $M = 54$, а все порядки довольно близки к 4, только порядки $p_{H_h^1}$, $p_{\mathcal{E}_h}$ начинают отдаляться от 4 при максимальных взятых $N = 375$, $M = 250$ из-за влияния вычислительной погрешности, поскольку соответствующие нормы содержат разностные отношения, а сами погрешности уже достигли значений порядка 10^{-13} .

Последний столбец таблицы содержит отношения времен ЦПУ для последовательных значений N и M ; они достаточно близки к теоретическому значению 7.72.

Таблица 1

Схема 4-го порядка: погрешности $e_{L_h^2}$, $e_{H_h^1}$, $e_{\mathcal{E}_h}$, скорости сходимости $p_{L_h^2}$, $p_{H_h^1}$, $p_{\mathcal{E}_h}$ и отношение времен ЦПУ для переменного ρ и решения типа бегущей волны

N	M	$e_{L_h^2}$	$e_{H_h^1}$	$e_{\mathcal{E}_h}$	$p_{L_h^2}$	$p_{H_h^1}$	$p_{\mathcal{E}_h}$	CPU_{rel}
81	54	3.025E-11	1.906E-10	2.155E-10	—	—	—	—
135	90	3.983E-12	2.499E-11	2.825E-11	3.969	3.977	3.977	6.98
225	150	5.212E-13	3.264E-12	3.693E-12	3.981	3.985	3.984	7.41
375	250	6.792E-14	5.065E-13	5.932E-13	3.989	3.648	3.579	7.87

Таблица 2

Схема 2-го порядка: погрешности $e_{L_h^2}$, $e_{H_h^1}$, e_{ε_h} , скорости сходимости $\rho_{L_h^2}$, $\rho_{H_h^1}$, ρ_{ε_h} и отношение времен ЦПУ для переменного ρ и решения типа бегущей волны

N	M	$e_{L_h^2}$	$e_{H_h^1}$	e_{ε_h}	$\rho_{L_h^2}$	$\rho_{H_h^1}$	ρ_{ε_h}	CPU_{rel}
81	54	3.112E-07	2.213E-06	2.408E-06	—	—	—	—
135	90	1.125E-07	8.011E-07	8.715E-07	1.991	1.989	1.990	6.92
225	150	4.062E-08	2.894E-07	3.147E-07	1.995	1.993	1.994	7.44
375	250	1.465E-08	1.044E-07	1.135E-07	1.997	1.996	1.996	7.72

Для сравнения в таблице 2 представлены аналогичные результаты для стандартной трехслойной явной схемы 2-го порядка точности. Очевидно резкое уменьшение погрешностей и увеличение скорости их убывания для схемы 4-го порядка в сравнении со схемой 2-го порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zlotnik A. *On Properties of an Explicit in Time Fourth-Order Vector Compact Scheme for the Multidimensional Wave Equation*. Preprint. 2021;1–15. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2105.07206>.
2. Zlotnik A., Lomonosov T. On Stability and Error Bounds of an Explicit in Time Higher-Order Vector Compact Scheme for the Multidimensional Wave and Acoustic Wave Equations. *Appl. Numer. Math.* 2024;195:54–74. DOI: 10.1016/j.apnum.2023.09.006.
3. Jiang Y., Ge Y. An Explicit Fourth-Order Compact Difference Scheme for Solving the 2D Wave Equation. *Adv. Difference Equat.* 2020;415:1–14. DOI: 10.1186/s13662-020-02870-z.
4. Jiang Y., Ge Y. An Explicit High-Order Compact Difference Scheme for the Three-Dimensional Acoustic Wave Equation with Variable Speed of Sound. *Int. J. Comput. Math.* 2023;100(2):321–341. DOI: 10.1080/00207160.2022.2118524.
5. Валиуллин А. Н. *Схемы повышенной точности для задач математической физики*. Новосибирск: Изд-во НГУ; 1973.
6. Matus P. P., Anh H. T. K. Compact Difference Schemes for the Multidimensional Klein-Gordon Equation. *Diff. Equat.* 2022;58(1):120–138. DOI: 10.1134/S0012266122010128.
7. Smith F., Tsynkov S., Turkel E. Compact High Order Accurate Schemes for the Three Dimensional Wave Equation. *J. Sci. Comput.* 2019;81(3):1181–1209. DOI: 10.1007/s10915-019-00970-x.
8. Zlotnik A., Kireeva O. On Compact 4th Order Finite-Difference Schemes for the Wave Equation. *Math. Model. Anal.* 2021;26(3):479–502. DOI: 10.3846/mma.2021.13770.
9. Zlotnik A., Čiegis R. On Construction and Properties of Compact 4th Order Finite-Difference Schemes for the Variable Coefficient Wave Equation. *J. Sci. Comput.* 2023;95(1):3. DOI: 10.1007/s10915-023-02127-3.
10. Deng D., Zhang C. Analysis of a Fourth-Order Compact ADI Method for a Linear Hyperbolic Equation with Three Spatial Variables. *Numer. Algorithms.* 2013;63:1–26. DOI: 10.1007/s11075-012-9604-8.
11. Liao H.-L., Sun Z.-Z. A Two-Level Compact ADI Method for Solving Second-Order Wave Equations. *Int. J. Comput. Math.* 2013;90(7):1471–1488. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1080/00207160.2012.754016>.
12. Liao W. On the Dispersion and Accuracy of a Compact Higher-Order Difference Scheme for 3D Acoustic Wave Equation. *J. Comput. Appl. Math.* 2014;270:571–583. DOI: 10.1016/j.cam.2013.08.024.
13. Zhang W. A New Family of Fourth-Order Locally One-Dimensional Schemes for the 3D Elastic Wave Equation. *J. Comput. Appl. Math.* 2019;348:246–260. DOI: 10.1016/j.cam.2018.08.056.
14. Li K., Liao W., Lin Y. A Compact High Order Alternating Direction Implicit Method for Three-Dimensional Acoustic Wave Equation with Variable Coefficient. *J. Comput. Appl. Math.* 2019;361(1):113–129. DOI: 10.1016/j.cam.2019.04.013.
15. Zlotnik A., Čiegis R. On Higher-Order Compact ADI Schemes for the Variable Coefficient Wave Equation. *Appl. Math. Comput.* 2022;412:126565. DOI: 10.1016/j.amc.2021.126565.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ОПЕРАЦИИ ИХ НАМОТКИ

Г. В. Смирнов^а, Н. В. Замятин^б

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,

Российская Федерация

^а ✉ smirnov@main.tusur.ru, ^б zamnv47@gmail.com

Аннотация: провода с эмалевой изоляцией широко используются в различных электротехнических изделиях. Контроль эмалевой изоляции проводов крайне необходим в технологическом процессе их изготовления для повышения надежности. Существующие методы позволяют контролировать только дефекты, которые уже имеются до намотки. Поэтому описывается способ и устройство, позволяющие определять такие дефекты в процессе намотки, как их количество, так и размеры. Для принятия решения о дефекте применяется нейронная сеть с прямым распространением и подстройкой синаптических коэффициентов в ходе технологического процесса. Приведен пример реализации такого способа и устройства.

Ключевые слова: электропривод, эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, нейронная сеть, синапсы.

Для цитирования: Смирнов Г. В., Замятин Н. В. Нейронная сеть для контроля изоляции обмоток электротехнических изделий в процессе операции их намотки. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):13–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02.

Поступила в редакцию: 02.08.2024.

В окончательном варианте: 25.08.2024.

A NEURAL NETWORK FOR MONITORING INSULATION DURING COIL WINDING

G. V. Smirnov^a, N. V. Zamyatin^b

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

^a ✉ smirnov@main.tusur.ru, ^b zamnv47@gmail.com

Abstract: the use of enamel-insulated wires is widespread in various electrical products, making insulation control crucial during the manufacturing process to ensure reliability. Current methods can only detect defects in the insulation prior to the winding process. This study presents a method and device that enable the detection of insulation defects during the winding process, identifying both the number and size of defects in real-time. A feedforward neural network with synaptic coefficient adjustment is employed to make decisions about defect presence during manufacturing. An example implementation of this method and device is also provided.

Keywords: electric drive, enamel insulation, defect, defect sensor, neural network, synapses.

Cite this article: Smirnov G. V., Zamyatin N. V. A Neural Network for Monitoring Insulation During Coil Winding. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):13–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-02.

Original article submitted: 02.08.2024.

Revision submitted: 25.08.2024.

Введение

Такие виды изделий, как электрические двигатели, трансформаторы, сельсины, реле, являются одними из самых распространенных видов продукции электротехнических изделий. Согласно статистике электроприводом оснащены примерно 85% всех двигательных и силовых механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, разнообразные технологические машины, бытовая техника и др.) [3–8]. Асинхронные двигатели (АД) стали изделием массового применения, и на сегодня они потребляют около 75 % вырабатываемой во всем мире электроэнергии [3].

Надежность этого вида изделий лимитируется состоянием их изоляции [2]. При этом самым ненадежным элементом этой изоляции является витковая изоляция, так как на ее долю приходится около 78% всех отказов электродвигателей [1, 2]. В свою очередь витковая изоляция — это эмалевая изоляция провода удвоенной толщины. При наличии в витковой изоляции дефектов, расстояние между

которыми меньше, чем это требуется для зажигания коронного или поверхностного разряда, может произойти пробой изоляции, который приведет к отказу электродвигателя.

Существующие методы контроля эмалированной изоляции проводов предназначены, как правило, для входного или выходного контроля состояния изоляции провода [3]. Разработанные способы и устройства контроля позволяют контролировать только те дефекты в изоляции провода, которые уже имеются на нем до процесса намотки обмоток. Эти дефекты с помощью разработанных способов и приборов могут быть обнаружены и в процессе намотки обмоток, когда провод движется с различными переменными скоростями [1, 2, 3].

Но для их реализации требуются датчики дефектов, наиболее распространенные из которых работают на принципе зажигания коронного разряда, возникающего между датчиком и жилой провода в месте дефекта. Основным недостатком таких устройств является необходимость датчика дефектов, на который подается высокое напряжение и имеется потребность заземления жилы провода. Однако преобладающее количество дефектов в изоляции проводов возникает именно в процессе намотки, что обусловлено большими усилиями при намотке на изоляцию провода, за счет которых происходит удлинение провода и растрескивание изоляции [4–10]. При соприкосновении с элементами намоточного станка происходит разрушение эмалированной изоляции и в ней образуются дефекты в виде сдиров, трещин и царапин. Именно эти, технологические дефекты, возникающие при намотке обмоток, и являются основной причиной отказа обмоток электродвигателей.

Были попытки решения проблемы выявления технологических дефектов в работах [11, 12], однако в этих решениях можно было зарегистрировать только наличие дефектов в изоляции провода, но нельзя было определить их размеры, в частности, протяженность. А этот показатель не менее важен при оценке качества изоляции обмоток. В частности, такие дефекты, как точечный прокол изоляции, могут и не привести к отказу обмотки. А если же дефект, например, сдир изоляции в определенных местах, имеет определенную протяженность, то риск замыкания в обмотке или пробоя изоляции в месте таких протяженных дефектов во много раз возрастает. Чем протяженнее дефект, тем выше вероятность пробоя или замыкания в обмотке. Кроме того, все упомянутые способы — измерители дефектов требуют подсоединения жилы провода к источнику тока или ее заземления, что значительно усложняет их применение. В статье приводится один из вариантов контроля дефектности в изоляции обмоток, который позволяет определить не только количество повреждений в упомянутой изоляции, но и их размеры (протяженность). Кроме того, предлагаемый способ позволяет осуществить гальваническую развязку между жилой провода и датчиками дефектов. В рассматриваемом примере в качестве датчиков дефектов предлагается использовать элементы намоточного оборудования, а гальваническая развязка обеспечивается генератором наводки, создающим в жиле провода наведенную ЭДС.

Структурная схема измерителя дефектности и принцип его работы

На рис. 1 приведена структурная схема предлагаемого устройства.

На рис. 2 приведены эпюры сигналов, служащие для пояснения сущности технического решения.

На рис. 3 приведена нейронная сеть для распознавания дефектов и управления.

Сущность предлагаемого устройства заключается в следующем. При намотке обмоток в изоляции провода могут иметь место два вида дефектов: входные и технологические дефекты. Под входными дефектами понимают те дефекты, которые уже имеются в изоляции провода при его поставке. Под технологическими дефектами понимается повреждение изоляции провода элементами 4, 5, 6, 7, 8 (рис. 1) намоточного оборудования до жилы провода. В реальном намоточном станке элементы 4, 5, 6, 7, 8 представляют собой дискообразные ролики, через которые проходит провод 1 при намотке его на шаблон 3. Расстояние L_i между каждым из упомянутых элементов определяют и вносят в память нейронной сети 17. Измерение и внесение упомянутых L_i расстояний между элементами намоточного станка в нейронную сеть необходимо для правильного определения количества и протяженности дефектов в изоляции провода и исключения ошибок в процессе контроля.

Ошибки в процессе контроля могут быть обусловлены тем, что один и тот же дефект может быть посчитан столько раз, сколько раз жила провода в дефектном месте изоляции соприкоснется с различными элементами намоточного станка. Чтобы этого не происходило, в нейронной сети рассматривают различные варианты возможного ложного счета и разрабатывают алгоритмы их исключения. Предположим, в изоляции провода имеется в состоянии поставки или образовался в процессе намотки

некоторый дефект, и он проходит через элемент 4 намоточного станка, являющийся роликом смотчика (рис. 1).

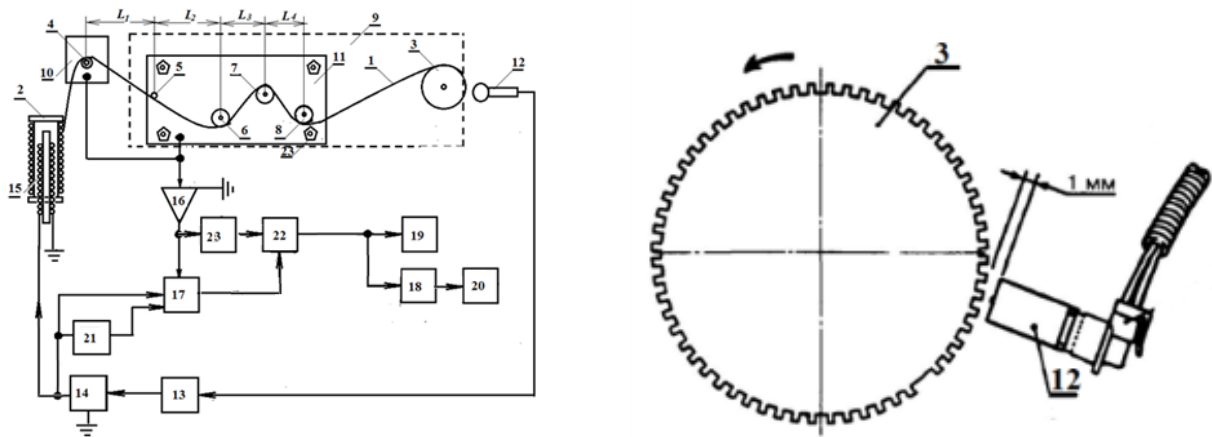


Рис. 1. Структурная схема измерителя дефектов

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 — провод; 2 — катушка; 3 — шаблон; 4 — ролик смотчика; 5, 6, 7, 8 — ролики намоточного станка; 9 — корпус станка; 10 — платформа ролика смотчика; 11 — платформа роликов станка; 12 — датчик скорости; 13 — формирователь импульсов скорости; 14 — генератор импульсов наводки; 15 — излучатель; 16 — высокоомный усилитель; 17 — компьютер с нейронной сетью; 18 — низкочастотный фильтр; 19 — счетчик протяженности входных дефектов; 20 — счетчик количества дефектов; 21 — счетчик длины провода; 22 — ключевое устройство; 23 — линия задержки.

Жила провода в месте этого дефекта при дальнейшем движении провода при намотке может соприкоснуться только с роликами 5, 6, 7 и 8, которые являются элементами намоточного станка. Рассчитаем возможные расстояния S_i , пройдя которые, дефект, обнаруженный в элементе 4 намоточного оборудования, дойдет до последующих роликов и может вызвать с этими элементами замыкание жилы провода. Путь S_1 до ролика 5 равен расстоянию L_1 , т. е. $S_1 = L_1$. Путь S_2 до ролика 6 равен $S_2 = L_1 + L_2$; путь S_3 до ролика 7 равен $S_3 = L_1 + L_2 + L_3$; путь S_4 до ролика 8 равен $S_4 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$.

Если дефект вызвал контакт жилы провода на ролике 5, то он может при движении в процессе намотки вызвать замыкания на роликах 6, 7 и 8, пройдя соответствующие пути $S_3 = L_2$; $S_6 = L_2 + L_3$ и $S_7 = L_2 + L_3 + L_4$.

Если дефект возник или проявил себя на ролике 6, то он в дальнейшем может вызвать замыкания на роликах 7 и 8, пройдя соответствующие пути $S_8 = L_3$; $S_9 = L_3 + L_4$. Если дефект образовался и проявил себя замыканием жилы провода на ролике 7, то он может вызвать замыкания только на ролике 8, пройдя соответствующий путь $S_{10} = L_4$.

Рассмотренные варианты возможных расстояний, проходимых дефектным участком в изоляции провода, от элемента, в котором он проявился замыканием, до последующих элементов, в которых он может вызвать повторное замыкание и ложный счет дефектов, вносят в нейронную сеть в процессе ее обучения.

При движении провода 1 в процессе намотки обмоток датчик 12 скорости (рис. 1) вырабатывает импульсы скорости, частота которых пропорциональна скорости V движения провода. Эти импульсы поступают на вход формирователя 13 импульсов скорости, который по существу является умножителем частоты. В формирователе 13 импульсов скорости происходит формирование их по напряжению и крутизне фронтов. Сформированные импульсы скорости поступают на вход генератора импульсов наводки 14 и с его выхода — на вход катушки излучателя 15. Излучатель 15 излучает эти импульсы и индуцирует соответствующую наводку в виде серии этих импульсов в катушке 2 обмоточного провода.

Одновременно с этим сгенерированные импульсы скорости в генераторе наводки 14 поступают в счетчик 21 длины проконтролированного провода.

Работу измерителя дефектов поясняют эпюры, приведенные на рис. 2.

На счетный вход счетчика 21 длины проконтролированного провода непрерывно поступают импульсы скорости с генератора 14 наводки, с периодом следования, равным прохождению под датчи-

ком скорости фиксированной определенной длины l_3 провода, например $l_3 = 0,025$ мм (рис. 2, эюры А и Б).

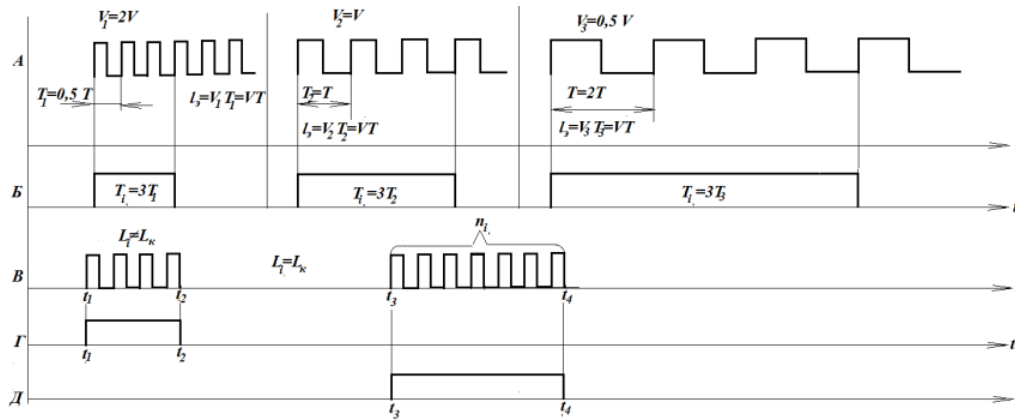


Рис. 2. Эюры сигналов

Так как длительность одного импульса скорости соответствует прохождению через датчик дефектов строго фиксированной элементарной длины провода l_3 , величина которой остается неизменной при изменении скорости, то проконтролированная длина провода определяется величиной $l_{пр} = l_3 \times m_{пр}$, где $m_{пр}$ — количество импульсов скорости, прошедших в счетчик 22 за время контроля.

Обозначим период следования импульсов скорости с формирователя (умножителя частоты 13) импульсов скорости через T_1 . При скорости движения провода V_1 на выходе формирователя 13 появляются импульсы частотой $f_1 = \frac{1}{T_1}$. При этом за время одного периода сигнальных импульсов провод пройдет расстояние l_3 , принятое за единицу измерения протяженности дефекта, равное по величине протяженности эквивалентного точечного повреждения (рис. 2, эюры А и Б):

$$l_3 = V_1 \times T_1. \quad (1)$$

При измерении скоростей протягивания провода в g раз пропорционально ей в g раз изменяется и частота импульсов эквивалентных точечных повреждений, что приводит к неизменности величины, определяемой по выражению (1).

Действительно, частота импульсов скорости изменяется пропорционально скорости провода $V_{пр}$. K_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции датчика скорости.

За время одного периода индуцированного в датчике скорости напряжения через датчик-электрод проходит участок провода длиной l_3 , равный

$$l_3 = V_{пр} \times T_3 \cong \frac{V_{пр}}{f} = \frac{V_{пр}}{K_1 V_{пр}} = \frac{1}{K_1}, \quad (2)$$

где $T_3 = \frac{1}{f}$ — период импульсов в датчике скорости.

Как следует из выражения (2), величина l_3 не зависит от скорости движения провода. Приняв l_3 за единицу измерения, можно определить, какая длина провода $l_{пр}$ прошла через датчик длины провода за любой интервал времени, если посчитать количество импульсов скорости n в счетчике (рис. 1) за время контроля $T_{кон}$ указанного отрезка провода:

$$l_{пр} = n \times l_3, \quad (3)$$

где $l_{пр}$ — длина отрезка провода, прошедшего в счетчик 22 длины проконтролированного провода; n — количество импульсов скорости за время $T_{пр}$ движения провода при контроле.

Генератор 14 импульсов наводки подает эти импульсы на вход излучателя 15, который индуцирует импульсы ЭДС в катушке 2 обмоточного провода.

При прохождении участков обмоточного провода с бездефектной изоляцией через элементы 4, 5, 6, 7, 8, если элементы намоточного станка не повреждают изоляцию, никаких изменений, кроме подсчета количества импульсов скорости в счетчике 22 длины проконтролированного провода, в сигналах устройства не происходит.

Пусть в некоторый момент времени t_1 жила провода в дефектном месте изоляции соприкоснулась с одним из элементов 4, 5, 6, 7, 8. Допустим, контакт соответствующего элемента с жилой провода продолжался до некоторого момента времени t_2 . Так как все указанные элементы электрически изолированы от заземленного корпуса намоточного станка, то на элементе, с которым произошел контакт жилы провода, появляются импульсы наведенной в проводе ЭДС (рис. 2, эпюра В). Эти импульсы поступают на вход высокоомного усилителя 16 (рис. 1), усиливаются и с выхода упомянутого усилителя поступают на вход нейронной сети 17. Если это был первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка, то нейронная сеть никаких сигналов не вырабатывает, и импульсы скорости, задержанные в линии задержки 23 на время опроса и принятия решения нейронной сетью 17, проходят через ключевое устройство 22 на вход счетчика 19 протяженности дефектов и на вход формирователя 18 импульса дефекта. В формирователе 18 вырабатывается импульс дефекта, длительность которого T_i равняется $T_i = t_2 - t_1$ (рис. 2, эпюра Г) времени контакта жилы провода в месте дефекта с одним из элементов намоточного станка. Этот импульс поступает на вход счетчика 20 количества дефектов и подсчитывается. По количеству подсчитанных импульсов скорости, прошедших в счетчик 19 протяженности, определяется протяженность дефекта.

Если же это был не первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного провода, например, в момент времени t_3 , а первый контакт с каким-то элементом намоточного оборудования произошел во время t_1 , то счетчик 21 подсчитывает число N импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$, рассчитывает величину L_k пути, которую прошел провод за этот интервал времени, и передает это значение в нейронную сеть 17. Величину L_k нейронная сеть сравнивает с каждым из возможных вариантов расстояний S_i между элементами намоточного оборудования, по прохождению которых обнаруженный ранее дефект может вызвать повторное замыкание в последующих элементах устройства. Равенство $L_k = S_i$ соответствует одному из вариантов указанных расстояний, рассчитанных и внесенных в память значений входов для нейронной сети. Это означает, что дефект, проявивший себя в момент времени t_3 , ранее уже был зарегистрирован счетчиками 20 и 19 количества и протяженности дефектов, когда он в момент времени t_1 проходил через какой-то из элементов намоточного оборудования. Поэтому для исключения возможной ошибки, возникающей при прохождении одного и того же дефекта через различные элементы намоточного оборудования, повторные замыкания жилы провода на эти элементы, т.е. ложные подсчеты количества и протяженностей дефектов, при повторных контактах ранее зарегистрированного дефекта с последующими элементами намоточного оборудования необходимо исключить. Это исключение происходит следующим образом. При выполнении равенства $L_k = S_i$ нейронная сеть выдает запрещающий сигнал, длительность $T_{\text{зап}}$ которого определяется временем контакта $t_4 - t_3$ (рис. 2, эпюра Д) и обычно на некоторую величину Δ превышает указанное время, т.е. $T_{\text{зап}} = (t_4 - t_3) + \Delta$. Величина Δ обычно определяется из прагматических соображений экспериментально. Сформированный импульс запрета поступает на ключевое устройство 22 и запрещает на время $T_{\text{зап}}$ прохождение задержанного линией 23 сигнала от высокоомного усилителя 16 к счетчикам 20 и 19 количества и протяженности дефектов. Указанные счетчики отключаются на время $T_{\text{зап}}$, а указанный дефект и его протяженность в этих счетчиках не подсчитываются. По истечении времени $T_{\text{зап}}$ ключевое устройство возвращается в исходное состояние, разрешающее прохождение сигнала к счетчикам 19 и 20 с выхода высокоомного усилителя 16.

Если L_k не равняется ни одному из упомянутых выше значений S_i рассчитанных вариантов, то нейронная цепь не вырабатывает запрещающего сигнала, и ключевое устройство пропускает задержанные в линии задержки усиленные импульсы ЭДС на вход счетчиков 19 и 20.

Алгоритм работы компьютера с нейронной сетью

Вариантов работы нейронной сети при реализации описываемого устройства может быть множество. Рассмотрим один из них.

Пусть в некоторый момент времени, обозначим его t_1 , произошло касание жилы провода дефектного участка изоляции с любым из элементов намоточного станка 4, 5, 6, 7 или 8 (рис. 1). Пусть контакт соответствующего элемента с жилой провода продолжался до некоторого момента времени t_2 . Так как все указанные элементы электрически изолированы от заземленного корпуса намоточного станка, то на элементе, с которым произошел контакт жилы провода, появляются импульсы наведенной в проводе ЭДС (рис. 2, эпюра В). Эти импульсы поступают на вход высокоомного усилителя 16 (рис. 1), усиливаются и с выхода упомянутого усилителя поступают на вход нейронной сети 17. Если

это был первый контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка, то нейронная сеть никаких сигналов не вырабатывает, и импульсы скорости, задержанные в линии задержки 23 на время опроса и принятия решения нейронной сетью 17, проходят через ключевое устройство 22 на вход счетчика 20 протяженности дефектов и на вход формирователя 18 импульса дефекта. В формирователе 18 вырабатывается импульс дефекта, длительность которого T_i равняется $T_i = t_2 - t_1$ (рис. 2, эпюра Г) времени контакта жилы провода в месте дефекта с одним из элементов намоточного станка. Этот импульс поступает на вход счетчика 20 количества дефектов и подсчитывается. По количеству подсчитанных импульсов скорости, прошедших в счетчик 19 протяженности, определяется протяженность дефекта.

Пусть второй контакт жилы провода с любым из элементов намоточного станка произошел в момент времени t_3 . Количество импульсов скорости от момента t_1 первого касания жилы провода с любым элементом намоточного оборудования до момента второго касания жилой провода любого другого элемента намоточного станка в момент времени касания t_3 , будет равно $n_{1,3}$. Число $n_{1,3}$ импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$ определяет длину пути $l_{1,3}$, которую прошел провод за интервал времени $t_3 - t_1$.

Так как за один импульс скорости провод проходит элементарное расстояние l_3 , то расстояние $l_{1,3}$ нейронная сеть определит по формуле:

$$l_{1,3} = n_{1,3} \times l_3. \quad (4)$$

Поскольку на вход нейронной сети предварительно введены пути $S_i (i = 1, 2, \dots, 10)$, то нейронная сеть сравнивает вычисленный путь $l_{1,3}$ с каждым из путей S_i в сумматоре. Для этого нейронная сеть рассчитывает разницу между расстоянием, определенным по формуле (4), и каждым из путей S_i , введенных в ее память, по абсолютной величине по формуле:

$$\Delta_i = |l_{1,3} - S_i|. \quad (5)$$

Каждую из найденных величин Δ_i (их в нашем случае будет 10) нейронная сеть сравнивает с выбранной допустимой ошибкой Δ_p определения расстояния, например, равной $2l_M$.

Выполнение неравенства

$$\Delta_i \leq \Delta_p \quad (6)$$

хотя бы для одного из 10 выражений свидетельствует о том, что данный дефект уже был зарегистрирован счетчиками 19 и 20 при его предыдущем контакте в момент времени t_1 с одним из элементов оборудования. Контакт в момент времени t_3 с последующим элементом намоточного оборудования вызван тем же дефектом, который уже был зарегистрирован счетчиками 20 и 19 в момент t_1 , и его нужно исключить из последующего счета. Это исключение происходит следующим образом. При выполнении неравенства (6) нейронная сеть выдает запрещающий сигнал, длительность $T_{\text{зап}}$ которого определяется временем контакта $t_4 - t_3$ (рис. 2, эпюра Д) и обычно на некоторую величину Δ превышает указанное время, т.е. $T_{\text{зап}} = (t_4 - t_3) + \Delta$.

Величина Δ обычно определяется из прагматических соображений экспериментально. Сформированный импульс запрета поступает на ключевое устройство 22 и запрещает на время $T_{\text{зап}}$ прохождение задержанного линией 23 сигнала от высокоомного усилителя 16 к счетчикам 20 и 19 количества и протяженности дефектов. Указанные счетчики отключаются на время $T_{\text{зап}}$, и указанный дефект и его протяженность в этих счетчиках не подсчитываются. По истечении времени $T_{\text{зап}}$ ключевое устройство возвращается в исходное состояние, разрешающее прохождение сигнала к счетчикам 19 и 20 с выхода высокоомного усилителя 16.

Если же выполняется неравенство

$$\Delta_i \geq \Delta_p \quad (7)$$

для всех 10 выражений, то это свидетельствует о том, что дефект, вызвавший замыкание с одним из последующих элементов станка, ранее не был зарегистрирован и его нужно зафиксировать счетчиками 20 и 19. Для регистрации упомянутого дефекта при выполнении (7) для всех 10 выражений нейронная сеть не вырабатывает никаких запрещающих команд, и ключевое устройство пропускает данный сигнал к счетчикам 19 и 20, где он и регистрируется.

После выполнения операции подсчета количества импульсов скорости за интервал времени $t_3 - t_1$ и выражений (5) и (6), независимо от того, какое неравенство, (5) или (6), было выполнено, с момента времени t_3 счетчик вновь начинает подсчитывать импульсы скорости. Этот подсчет происходит

до момента t_5 следующего касания жилы провода в дефектном участке изоляции с одним из элементов намоточного оборудования. После выявления этого контакта определяется количество импульсов скорости $n_{3,5}$ и определяется длина участка провода, прошедшего за интервал времени $t_5 - t_3$ по формуле $l_{3,5} = n_{3,5} \times l_3$. Затем по формуле $\Delta_i = |l_{1,3} - S_i|$ определяется величина Δ_i , сравнивается с ошибкой Δ_p , и вся описанная выше процедура повторяется вновь.

Резюмируя вышесказанное, в общем виде можно представить алгоритм работы нейронной сети следующим образом:

1. Для нейронной сети счетчик подсчитывает количество импульсов $n_{j,j+1}$ скорости между двумя последующими замыканиями жилы провода с одним из элементов намоточного оборудования, происшедшими в моменты времени t_j и t_{j+1} соответственно.
2. Определяет отрезок пути $l_{j,j+1}$, который прошел провод за время $t_{j+1} - t_j$ по формуле $l_{j,j+1} = n_{j,j+1} \times l_3$.
3. Рассчитывает разницу между расстоянием, определенным по формуле, представленной в пункте 2, и каждым из путей S_i , введенных в ее память, по абсолютной величине по формуле: $\Delta_i = |l_{j,j+1} - S_i|$, где S_i — возможные расстояния между элементами намоточного станка (в рассматриваемой заявке $i=1,2,\dots,10$).
4. Каждую из найденных величин Δ_i (их в нашем случае будет 10) нейронная сеть сравнивает с выбранной допустимой ошибкой Δ_p определения расстояния, например Δ_p , равной $2l_3$.
5. При выполнении хотя бы в одном из 10 случаев неравенства $\Delta_i \leq \Delta_p$ нейронная сеть принимает решение об исключении подсчета дефекта, выявленного в момент времени t_{j+1} , так как этот дефект уже был зарегистрирован в момент времени t_j .
6. При выполнении во всех 10 случаях неравенства $\Delta_i \geq \Delta_p$ нейронная сеть принимает решение о необходимости подсчета дефекта, выявленного в момент времени t_{j+1} , так как этот дефект не был зарегистрирован ранее.

Нейронная сеть для распознавания и управления

Нейронная сеть предназначена для распознавания уникальности дефекта и выработки управляющего воздействия на ключевой элемент. Нейронная сеть имеет три слоя и функционирует в режиме сети прямого распространения и в режиме компаратора (рис. 3).

Первый слой является входным и имеет два входа: $n_{j,j+1}$ вход — значение количества импульсов и вход S_i — возможные расстояния между элементами намоточного станка (всего их 10).

Второй слой имеет 10 нейронов и состоит из синаптических коэффициентов и сумматора, в котором реализуется разность $l_{1,3} - S_i$.

Синаптических коэффициентов два на каждом нейроне: w_1 — элементарное расстояние l_3 для входа $n_{j,j+1}$ и w_2 равно -1 .

Вход $S_{1,3}$ умножается на l_3 , а вход S_i умножается на -1 . В сумматоре реализуется разность $l_{1,3} - S_i$.

Активационная функция представляет ступеньку с порогом в виде допустимой ошибки Δ_{pb} , и при этом реализуется условие $\Delta_i \leq \Delta$. Если $\Delta_i \leq \Delta$, то на выходе нейрона формируется 0, в противном случае 1.

Третий слой нейронной сети состоит из одного нейрона, функционирующего в режиме компаратора. Синаптические коэффициенты у всех входов равны 1, активационная функция в виде инверсного порога от 1 до 0. Если на входе все 0, то на выходе 1, значит, на ключевой элемент поступает 1 и дефект распознается как уникальный и фиксируется, в противном случае дефект является уже зафиксированным.

Пример реализации рассматриваемого способа контроля дефектности

Был проведен контроль с применением заявляемого устройства дефектности обмоточных проводов, блок-схема которого приведена на рис. 1. При намотке обмоточный провод проходил через ролик смотчика 4 и ролики 5, 6, 7, 8, являющиеся элементами намоточного станка. Указанные ролики изолировались от заземленного корпуса намоточного станка 9. Для этого они закреплялись на металлических платформах 10 и 11, и эти платформы через электроизоляционные прокладки из тефлона прикреплялись к корпусу станка 9 диэлектрическими стяжками 23, выполненными из капролактама.

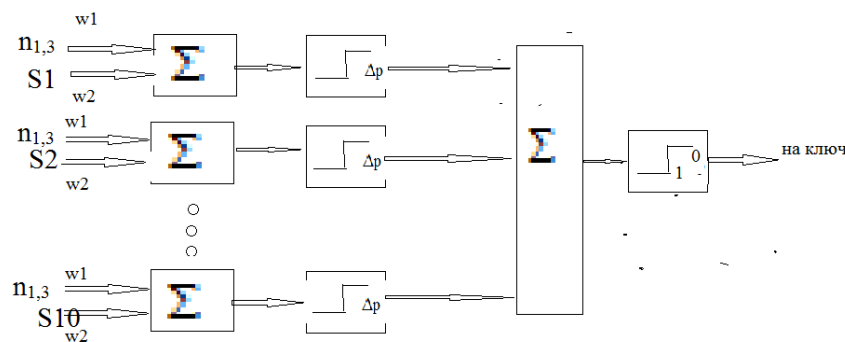


Рис. 3. Нейронная сеть для распознавания дефектов и управления

В качестве датчика скорости использовался индукционный датчик 12. Датчик скорости 12 и вращающийся диск 3, на котором закреплялся шаблон изготавливаемой всыпной обмотки статора электродвигателя, показаны внизу рис. 1 для пояснения работы индукционного датчика скорости 12. При намотке обмоток на шаблон, стальной диск 3, на котором этот шаблон располагается, начинает вращаться. При прохождении зубчатой части диска 3 возле катушки датчика скорости 12 за счет изменения величины магнитного потока индуцируются электрические импульсы, частота которых определяется размерами и количеством зубьев на диске 3 и скоростью вращения этого диска. При равномерной скорости вращения диска частота наведенных импульсов остается постоянной. При изменении скорости вращения диска изменяется и частота упомянутых импульсов пропорционально изменению скорости вращения диска. Полученные на выходе датчика 12 импульсы поступают на вход формирователя импульсов 13 скорости, представляющий собой умножитель частоты. Введение умножителя частоты позволяет повысить точность при определении протяженности дефектов. Сформированные импульсы скорости поступают на генератор наводки 14, и с его выхода проходят на катушку 15 излучателя. Электромагнитные импульсы излучателя 15 наводят в катушке провода 2 импульсную ЭДС, частота импульсов которой пропорциональна скорости. За время одного наведенного в катушке 2 импульса скорости проходит элементарный путь l_3 . За счет введения в устройство умножителя частоты удалось обеспечить величину $l_3 = 0,25$ мм.

Перед контролем измерялись расстояния между роликами смотчика и намоточного станка 4, 5, 6, 7, 8. Они были равны соответственно $L_1 = 620$ мм, $L_2 = 500$ мм, $L_3 = 400$ мм и $L_4 = 400$ мм.

По измеренным расстояниям L_i определялись варианты S_i возможных расстояний, которые может пройти дефектный участок после его обнаружения, за счет возникновения контакта жилы провода в этом участке с каким-то из элементов намоточного оборудования. Эти S_i приведены ниже:

$$S_1 = L_1 = 620 \text{ мм};$$

$$S_2 = L_1 + L_2 = 620 + 500 = 1120 \text{ мм};$$

$$S_3 = L_1 + L_2 + L_3 = 620 + 500 + 400 = 1520 \text{ мм};$$

$$S_4 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 620 + 500 + 400 + 400 = 1920 \text{ мм}.$$

Все величины L_i и S_i были внесены в нейронную сеть 17. Для проверки работоспособности заявляемого способа в изоляции провода искусственно были нанесены два дефекта, границы которых находились на расстоянии 300 мм, с протяженностями $l_1 = 5$ мм и $l_2 = 10$ мм. Вначале отрезок провода с нанесенными на него искусственными дефектами протягивался через все элементы намоточного оборудования при отключенной нейронной сети. При этом оба дефекта вызвали замыкание со всеми элементами намоточного оборудования, и без обученной нейронной сети счетчик количества дефектов показал 10, что говорило о том, что оба дефекта вызвали замыкание жилы провода на соответствующие элементы 4, 5, 6, 7, 8 элементов станка по одному разу.

После этого нейронную цепь подключали и протягивали со скоростью $V \approx 50$ мм/с упомянутый отрезок провода с нанесенными в его изоляции двумя дефектами через те же элементы намоточного станка, но при использовании схемы, приведенной на рис. 1, реализующей заявляемый способ.

Рассмотрим, как происходила регистрация количества и протяженности дефектов.

Таблица

Анализ вариантов замыканий жилы провода на элементы станка

№ контак- та, j	Время кон- такта, с	Продолжи- тельность контакта, с	Расстояние L_{jk} , пройденное проводом от момента контак- та j к моменту контакта k, мм	Вывод нейрон- ной сети	Запрещающий сигнал нейронной сети (да, нет)
1	12,5	0,1	$L_{0,1} = 0$	$L_{0,1} \neq S_i$	нет
2	18,5	0,2	$L_{1,2} = 300$	$L_{1,2} \neq S_i$	нет
3	24,9	0,1	$L_{2,3} = 320$ $L_{1,3} = 620$	$L_{1,3} = S_i$ $L_{2,3} \neq S_i$	да
4	30,9	0,2	$L_{3,4} = 320$ $L_{2,4} = 620$ $L_{1,4} = 920$	$L_{3,4} \neq S_i$ $L_{2,4} = S_i$ $L_{1,4} \neq S_i$	да
5	34,9	0,1	$L_{4,5} = 320$ $L_{3,5} = 620$ $L_{2,5} = 920$ $L_{1,5} = 1120$	$L_{3,4} \neq S_i$ $L_{2,4} = S_i$ $L_{1,4} \neq S_i$ $L_{1,5} \neq S_i$	да
6	40,9	0,2	$L_{5,6} = 320$ $L_{4,6} = 620$ $L_{3,6} = 920$ $L_{2,6} = 1120$ $L_{1,6} = 1420$	$L_{5,6} \neq S_i$ $L_{4,6} = S_i$ $L_{3,6} \neq S_i$ $L_{2,6} = S_i$ $L_{1,6} \neq S_i$	да
7	42,9	0,1	$L_{6,7} = 320$ $L_{4,6} = 620$ $L_{3,6} = 920$ $L_{2,6} = 1120$ $L_{1,6} = 1420$ $L_{1,7} = 1520$	$L_{6,7} \neq S_i$ $L_{4,6} = S_i$ $L_{3,6} \neq S_i$ $L_{2,6} = S_i$ $L_{1,6} \neq S_i$ $L_{1,7} \neq S_i$	да
8	48,9	0,2	$L_{7,8} = 320$ $L_{6,8} = 620$ $L_{5,8} = 920$ $L_{4,8} = 1120$ $L_{3,8} = 1420$ $L_{2,8} = 1520$ $L_{1,9} = 1820$	$L_{7,8} \neq S_i$ $L_{6,8} = S_i$ $L_{5,8} \neq S_i$ $L_{4,8} = S_i$ $L_{3,8} \neq S_i$ $L_{2,8} = S_i$ $L_{1,9} \neq S_i$	да
9	50,9	0,1	$L_{8,9} = 320$ $L_{7,9} = 620$ $L_{6,9} = 920$ $L_{5,9} = 1120$ $L_{4,9} = 1420$ $L_{3,9} = 1520$ $L_{2,9} = 1820$ $L_{1,9} = 1920$	$L_{8,9} \neq S_i$ $L_{7,9} = S_i$ $L_{6,9} \neq S_i$ $L_{5,9} = S_i$ $L_{4,9} \neq S_i$ $L_{3,9} = S_i$ $L_{2,9} \neq S_i$ $L_{1,9} = S_i$	да
10	56,9	0,2	$L_{9,10} = 320$ $L_{8,10} = 620$ $L_{7,10} = 920$ $L_{6,10} = 1120$ $L_{5,10} = 1420$ $L_{4,10} = 1520$ $L_{3,10} = 1820$ $L_{2,10} = 1920$ $L_{1,10} = 2220$	$L_{9,10} \neq S_i$ $L_{8,10} = S_i$ $L_{7,10} \neq S_i$ $L_{6,10} = S_i$ $L_{5,10} \neq S_i$ $L_{4,10} = S_i$ $L_{3,10} \neq S_i$ $L_{2,10} = S_i$ $L_{1,10} \neq S_i$	да

В момент времени с начала протягивания провода $t_1 = 12,4$ с было обнаружено первое замыкание. Оно продолжалось до $t_2 = 12,5$ с. На выходе усилителя 16 за время $T_1 = t_2 - t_1 = 12,5 - 12,4 = 0,1$ с появилось 20 импульсов скорости. Поскольку до момента времени t_1 никакого замыкания в схеме не было обнаружено, то $L_{jk} = 0$. Нейронная сеть 17 сравнила величину $L_{jk} = 0$ с каждым из вариантов S_i , приведенных выше. Поскольку L_{jk} не равнялось ни одному из приведенных выше вариантов расстояний, т.е. $L_k \neq S_i$, то на ключевое устройство 22 из нейронной сети 17 запрещающего сигнала не поступало и импульсы, задержанные в линии задержки 23, прошли в счетчик 19 протяженности дефектов и на вход формирователя импульса дефекта 18, на выходе которого появился импульс дефекта длительностью $T_1 = 0,1$. В счетчик 19 прошло 20 импульсов скорости, которые соответствовали протяженности дефекта $l_1 = l_3 \times n_1 = 0,25 \times 20 = 5$ мм. Счетчик 20 посчитал 1 дефект.

Второе и последующие замыкания жилы провода в одном из нанесенных дефектов с различными элементами намоточного оборудования и рассмотрение вариантов анализа, которые происходили в обученной нейронной сети, отображены в приведенной ниже таблице.

В момент времени $t_3 = 18,5$ с произошло второе замыкание жилы провода в одном из дефектов с каким-то элементом намоточного станка. С этого момента на выходе высокоомного усилителя 16 появилась серия из 40 импульсов скорости, которая продолжалась до момента времени $t_4 = 18,7$ с. С момента времени t_1 до момента времени t_3 в счетчик 22 длины проконтролированного провода поступило 1200 импульсов, что соответствовало расстоянию $L_k = 300$ мм, которое прошел провод после первого, выявленного в момент времени t_1 контакта жилы провода в дефектном участке изоляции с каким-то элементом намоточного станка.

Поскольку $L_k = 300$ мм не равнялось ни одному из приведенных выше вариантов расстояний, т.е. $L_k \neq S_i$, то на ключевое устройство 22 из нейронной сети 17 никакого сигнала не поступало, и импульсы скорости с выхода высокоомного усилителя 16, задержанные в линии задержки 23, прошли в формирователь импульса дефекта 18 и на входы счетчиков 19 и 20. Счетчик количества дефектов 20 зарегистрировал второй дефект, а счетчик 19 протяженности дефектов, в котором было подсчитано 40 импульсов скорости, показал, что протяженность обнаруженного второго дефекта $l_2 = l_3 \times n_2 = 0,25 \times 40 = 10$ мм.

Аналогичная процедура анализа и выработки решений в нейронной сети при каждом очередном замыкании жилы провода в одном из дефектов отображена в таблице.

В результате проведенного контроля провода с нанесенными в его изоляции двумя искусственными дефектами с использованием устройства (рис. 1), реализующего рассматриваемый способ, было зарегистрировано 2 дефекта, один из которых имел протяженность 5 мм, а другой — 10 мм.

Таким образом, по сравнению с известными ранее измерителями дефектности изоляции обмоточных проводов, предлагаемое устройство позволяет производить контроль реального процесса намотки обмоток электротехнических изделий с гальванической развязкой элементов и для его реализации отпадает необходимость специального изготовления датчика дефектов, исключается необходимость использования высокого напряжения для питания датчика дефектов, исчезает необходимость очистки от изоляции одного из концов провода и подсоединения его к общей шине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Г. В. *Пооперационный контроль процесса изготовления обмоток электрических машин*. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия — Телеком»; 2018. 156 с.
2. Хомутов С. О., Семичевский П. И., Кобозев Е. В. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов. *Ползуновский вестник*. 2009;1–2:220–229.
3. Смирнов Г. В., Смирнов Д. Г. Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горношахтного и нефтепромышленного оборудования. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016;327(2):102–116.4.
4. Курбатова О. А., Павлюченко В. М. *Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования*. Владивосток: Изд-во ДВГТУ; 2004. 286 с.
5. Колмаков Е. А., Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти. *Вестник КузГТУ*. 2016;1:150–155.
6. Каширских В. Г., Гаргаев А. Н., Завьялов В. М., Семькина И. Ю. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов. *Вестник КузГТУ*. 2016;6:159–168.
7. Русский Е. Ю. Анализ прочности роторов шахтных осевых вентиляторов. *Вестник КузГТУ*. 2015;2:31–34.
8. Герике П. Б. Определение дефектов динамического оборудования тяговых лебедок экскаваторов типа драглайн по параметрам механических колебаний. *Вестник КузГТУ*. 2014;1:21–26.
9. Андрианов В. К., Васильев Е. Б. Состояние производства и научно-технические аспекты развития обмоточных проводов в России. *Кабели и провода*. 2014;5:3–6.
10. Бесперстов П. П., Заикин А. И., Пугачев К. Г., Кириллов Ю. А. Авторское свидетельство СССР № 1665320А1, кл. G01N27/68. Опубл. 23.07.91. Бюл. № 27.

11. Патент РФ 2737515 (по заявке 2020107811 от 21.02.20.) *Способ контроля дефектности изоляции обмоточных проводов* / Смирнов Г. В. Оpubл. 01.12.2020. Бюл. № 34.
12. Замятин Н. В., Смирнов Г. В. *Нейронные компьютерные системы и их применение*. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники; 2021. 316 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-03

АВТОНОМНАЯ МНОГОРАКУРСНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ РУЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ**И. М. Клемышев^{1,a}, С. М. Колчин^{2,b}, С. С. Лебедев^{2,c}, С. О. Старков^{3,d}**¹ *Общество с ограниченной ответственностью «Дженерал Компьютер Системс», г. Обнинск, Российская Федерация*² *Общество с ограниченной ответственностью «КомпВи», г. Обнинск, Российская Федерация*³ *Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация*^a *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7831-9474>, iklemyshev@gmail.com*^b *skol57@mail.ru*^c *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9626-0223>, compvi19@mail.ru*^d *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0420-7856>, sergeystarkov56@mail.ru*

Аннотация: в данной статье представлен прототип системы для автоматического контроля производственных процессов, выполняемых руками. Обученная система осуществляет мониторинг рабочего места с нескольких ракурсов наблюдения и производит анализ зафиксированных событий на основе искусственного интеллекта в реальном времени. При выявлении аномальных действий сотрудника или некорректности выполнения технологического процесса система оповещает оператора службы безопасности о событии, помогая ему принять решение или осуществить быстрый поиск по архивным записям видеонаблюдения для расследования инцидентов. Предложен механизм автокалибровки многоракурсной системы видеонаблюдения, основанный на одновременном наблюдении ключевых точек на руках, определении их расположения в пространстве и математическом решении задачи совмещения с нескольких ракурсов. Аппаратная часть прототипа программно-аппаратного комплекса (ПАК) состоит из двух стереокамер INTEL RealSense435 и вычислительного модуля с графическим процессором Jetson AGX Xavier. Программная часть состоит из подсистем: видеонаблюдения, хранения данных, нейросетевого анализа «цифрового образа».

Ключевые слова: компьютерное зрение, распознавание образов, искусственные нейронные сети, программно-аппаратный комплекс, интеллектуальная видеочасть, нейросетевой детектор.

Благодарности: работы, выполненные ООО «ДженералСиЭс», поддержаны Фондом содействия инновациям (грант № 142ГСИИИС12-D7/79659).

Для цитирования: Клемышев И. М., Колчин С. М., Лебедев С. С., Старков С. О. Автономная многоракурсная нейросетевая система компьютерного зрения для автоматизации контроля ручных операций. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-03.

Поступила в редакцию: 27.07.2024.

В окончательном варианте: 24.08.2024.

AUTONOMOUS MULTI-CAMERA NEURAL NETWORK COMPUTER VISION SYSTEM FOR MANUAL OPERATION MONITORING**I. M. Klemyshev^{1,a}, S. M. Kolchin^{2,b}, S. S. Lebedev^{2,c}, S. O. Starkov^{3,d}**¹ *General Computer Systems Limited liability company, Obninsk, Russian Federation*² *COMPVI Limited liability company, Obninsk, Russian Federation*³ *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation*^a *ORCID <http://orcid.org/0000-0001-7831-9474>, iklemyshev@gmail.com*^b *skol57@mail.ru*^c *ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9626-0223>, compvi19@mail.ru*^d *ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0420-7856>, sergeystarkov56@mail.ru*

Abstract: this paper presents a prototype system for the automatic monitoring of manual production processes. The trained system observes the workplace from multiple angles and analyzes recorded events in real time using artificial intelligence. When abnormal employee actions or incorrect execution of technological processes are detected, the system alerts the security service operator, assisting in decision-making or

facilitating a quick search through archived video surveillance records for incident investigation. A mechanism for the auto-calibration of the multi-angle video camera system is proposed, which simultaneously observes key points on the hands, determines their spatial location, and mathematically resolves the problem of combining images from multiple angles. The hardware component of the prototype consists of two Intel RealSense 435 stereo cameras and a computing module equipped with a Jetson AGX Xavier graphics processor. The software component includes several subsystems: video surveillance, data storage, and neural network analysis of the digital images.

Keywords: computer vision, pattern recognition, artificial neural networks, intelligent video camera, neural network detector.

Acknowledgements: this study is supported by the Innovations Promotion Fund (grant No. 142GS1IIS12-D7/79659).

Cite this article: Klemyshev I. M., Kolchin S. M., Lebedev S. S., Starkov S. O. Autonomous Multi-Camera Neural Network Computer Vision System for Manual Operation Monitoring. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-03.

Original article submitted: 27.07.2024.

Revision submitted: 24.08.2024.

Введение

Цифровизация предприятий идет на разных уровнях и в целом способствует оптимизации технологических процессов. Несмотря на автоматизацию производственных линий, доля ручного труда остается высокой и некоторые технологические циклы, выполняемые вручную, остаются за пределами возможной автоматизации. Тем актуальней является задача контроля правильности выполнения человеком технологического процесса, а также обнаружения событий в процессе работы, которые могут потенциально вести к рискам на производстве, снижению качества продукции, браку, хищению и утрате материальных ценностей.

На сегодняшний день задача безопасности и контроля производственных процессов на предприятиях решается в абсолютном большинстве случаев с помощью систем видеонаблюдения. Классическим решением для мониторинга ситуации на производстве или ином предприятии является система видеонаблюдения (СВН), которая состоит из видеосервера с хранилищем видеoarхива (системы хранения данных), специализированного ПО и подключенных к нему по сети IP-камер, расположенных в различных локациях предприятия. Такие системы являются в настоящее время привычным средством, используемым службой безопасности (СБ) и службой контроля качества технологических процессов предприятия для мониторинга рабочего процесса, соблюдения порядка, обнаружения опасных ситуаций и расследования инцидентов.

Современной СВН можно дать следующие характеристики:

- система дает оператору возможность одновременного наблюдения нескольких видеопотоков;
- камеры стандартно используются для наблюдения помещения, а не рабочего места;
- использование PTZ-камер (камера, которая поддерживает удаленное управление направлением и увеличением), то есть камер, которые дают оператору возможность поворота и приближения изображения;
- система, как правило, включает в себя интеллектуальную аналитику общего назначения:
 - детектирование людей;
 - распознавание лиц;
 - подсчет посетителей;
 - разметка видимой зоны для подсчета пересечения линии и т.п.;
- программная аналитика системы обрабатывает видеопотоки независимо, не связывая результаты их обработки.

Предприятия, оборудованные стандартной СВН, как правило, представляют собой помещения с несколькими рабочими местами/зонами, осматриваемые одной или несколькими камерами, расположенными под потолком. Такая система может помочь службе безопасности в определении действий людей на уровне помещения, связанными с пространственным перемещением, общей жестикой, взаимодействием с окружающими предметами вроде мебели, с проемами и друг с другом.

Когда речь заходит о применении обычной СВН для наблюдения за действиями сотрудников, которые они выполняют на рабочем месте, то можно наблюдать нехватку необходимого функционала для правильного анализа ситуации:

- возможность фокусировки (при использовании PTZ-камеры) только на одном рабочем месте в помещении в один момент времени; без PTZ-камер возможности мониторинга сводятся к пассивному наблюдению с одной точки, как правило, удаленной от каждого рабочего места на расстояние не менее 2 метров;

- наблюдение за рабочими местами только с одной фиксированной позиции, что означает для сотрудника возможность сокрытия действий от наблюдений;

- отсутствие программной аналитики для распознавания действий человека, в том числе выполняемых руками, и системы поддержки принятия решений для СБ на основе данной аналитики.

В свою очередь, предлагаемую нами систему отличает:

- мониторинг с использованием нескольких ракурсов наблюдения, что исключает возможность сокрытия действий и потери системой объекта наблюдения;

- наличие программной подсистемы, набирающей статистику действий сотрудника, за работой которого ведется наблюдение, на основании которой создается «цифровой образ» человека;

- подсистема анализа, способная выявлять аномальное поведение сотрудника в реальном времени, отталкиваясь от собранного «цифрового образа» его паттернов поведения.

В основе функционала нашей системы лежит механизм «захвата движения» по видеоизображению. Сама по себе задача произвести «захват движения» не нова, и на рынке присутствуют датчики, способные делать это.

Работы по теме

Одна из наиболее известных существующих систем, позволяющих производить «захват движения» рук человека, — контроллер Leap Motion, созданный для управления компьютером (или приставкой, ТВ) с помощью жестов и движения рук [1]. Он основан на принципе стереоскопического зрения, что позволяет контроллеру анализировать глубину изображения и, следовательно, получать координаты положения рук в 3D. Встроенные вычислительные мощности позволяют Leap Motion распознавать, анализировать действия человека руками и выполнять соответствующие заданные команды. При всех положительных характеристиках данного устройства оно не может выступать в качестве сенсора предлагаемой многоракурсной системы по причинам, изложенным ниже.

По отзывам пользователей данного контроллера, есть большая доля ошибок в распознавании рук при их близком расположении и сцепке (переплетение и пересечение пальцев двух рук).

Еще одна разработка в данной сфере — проект многоракурсной системы с использованием контроллеров Azur Kinect от Microsoft. Для описания двух рук и объектов в работе использованы 5 камер Azur Kinect [2]. Результаты исследований говорят о том, что система хорошо определяет положение рук в пространстве. За счет того, что система имеет несколько ракурсов, она способна видеть руки в сложных случаях, когда рука видна не полностью, закрыта или невидима с определенной стороны. Однако у этой системы есть следующая особенность: низкое качество работы при сильном освещении и на расстоянии от объекта меньше 80 см. Не считая того, что промышленного варианта такой системы не существует и эта работа является прототипом, означенные особенности не позволяют применить ее в предлагаемой системе.

Для точного распознавания действий человека и анализа жестов рук многоракурсной видеосистемой необходим выбор подхода к калибровке нескольких камер для наиболее точного совмещения пространственной информации, полученной с разных ракурсов наблюдения. В [3], [4] представлены различные методологии калибровки с использованием 2D и 3D подходов. В работе [5] предложено для калибровки системы из нескольких камер использовать ключевые точки скелета человека, которые определяются в 2D с помощью ИНС в реальном времени.

Авторы [6] утверждают, что для точной оценки 3D позы человека с нескольких ракурсов перспективно использовать нейронную сеть СТР, которая напрямую работает в 3D пространстве.

В работе [7] описаны преимущества камер глубины RealSense D400 при создании многоракурсной системы.

Для работы с глубиной изображения одновременно с распознаванием жестов рук, скелета, лица и сегментации человека на основе ИНС в режиме реального времени необходимо аппаратное обеспечение с мощными CPU и графическими процессорами (GPU) и/или тензорными ядрами (TPU) для ускорения обработки данных. При создании автономных систем этим требованиям наилучшим образом соответствуют одноплатные компьютеры от NVIDIA серии Jetson. Связка стереокамер RealSense

серии D400 и одноплатного компьютера Jetson AGX Xavier хорошо себя зарекомендовала при разработке автономных систем компьютерного зрения и робототехники [8, 9].

Математическая модель

Алгоритм для реализации механизма многоракурсного нейросетевого анализа для автоматизации контроля производственных процессов, выполняемых руками, можно разбить на два основных блока операций:

- 1) работа многоракурсной системы видеонаблюдения с автоматической калибровкой;
- 2) работа подсистемы гибридного анализа действий, выполняемых руками.

Совместная работа двух блоков осуществляется путем последовательной передачи данных, полученных в результате работы многоракурсной системы, в подсистему гибридного анализа действий. Результаты работы последней отправляются на хранение в базу данных событий, с возможностью дальнейшего воспроизведения и изучения в графическом интерфейсе пользователя.

В зависимости от настроек системы, результаты работы подсистемы гибридного анализа действий могут непосредственно отображаться в интерфейсе пользователя в реальном времени и давать тревожные сигналы оператору при обнаружении аномальных действий сотрудника или нарушении технологического процесса производства для своевременной реакции на эти события.

Работа многоракурсной системы видеонаблюдения осуществляется одновременно с записью видеопотоков со всех ракурсов в специальное хранилище для дальнейшего воспроизведения.

Внутренний сервер системы предназначен для взаимосвязи основного приложения, запущенного на одноплатном компьютере, с графическим интерфейсом пользователя. С помощью программного интерфейса API осуществляется управление прототипом из графического интерфейса и передача данных от прототипа на панель управления АРМ оператора обратно.

Внутренний программный сервер, в зависимости от конфигурации системы и количества рабочих мест (одноплатных вычислительных модулей), может быть запущен как на одном из одноплатных модулей, так и на отдельной серверной машине, также включенной в сеть предприятия.

Общая схема работы разрабатываемой системы представлена на рис. 1.

Работа многоракурсной системы видеонаблюдения с автоматической калибровкой

Работа этой системы обеспечивает:

- 1) одновременное покадровое чтение видеопотоков с камер программно-аппаратного комплекса, подключенных к вычислительному модулю;
- 2) программную предобработку полученных кадров с целью улучшения качества их дальнейшей обработки;
- 3) трансляцию цветного видеоизображения с каждой камеры через web-сервер по протоколу http;
- 4) программную обработку кадров с целью «захвата движения» человека и его рук, находящихся в зоне наблюдения (включая трансляцию отладочных видеопотоков);
- 5) автоматическую калибровку многоракурсной СВН;
- 6) объединение информации с разных ракурсов наблюдения для получения полных и непрерывных данных о расположении ключевых точек рук человека.

Программная обработка кадров с целью «захвата движения» человека и его рук, находящихся в зоне наблюдения

Кадры видеоизображений с разных ракурсов (камер) наблюдения за рабочим процессом, поступившие в обработку, проходят несколько этапов, результатом которых является «захват движения» человека и его рук, находящихся в зоне наблюдения:

- 1) детекция ключевых точек скелета человека;
- 2) детекция ключевых точек кистей человека;
- 3) детекция (обнаружение) лица человека в кадре;
- 4) сегментация человека в кадре;
- 5) трекинг найденных объектов (ключевых точек, лиц).

Детекция ключевых точек кистей рук и скелета человека на цветном изображении выполняется с помощью специально обученных для этого ИНС: на данный момент это общепринятый и самый действенный способ решения подобного рода задач.

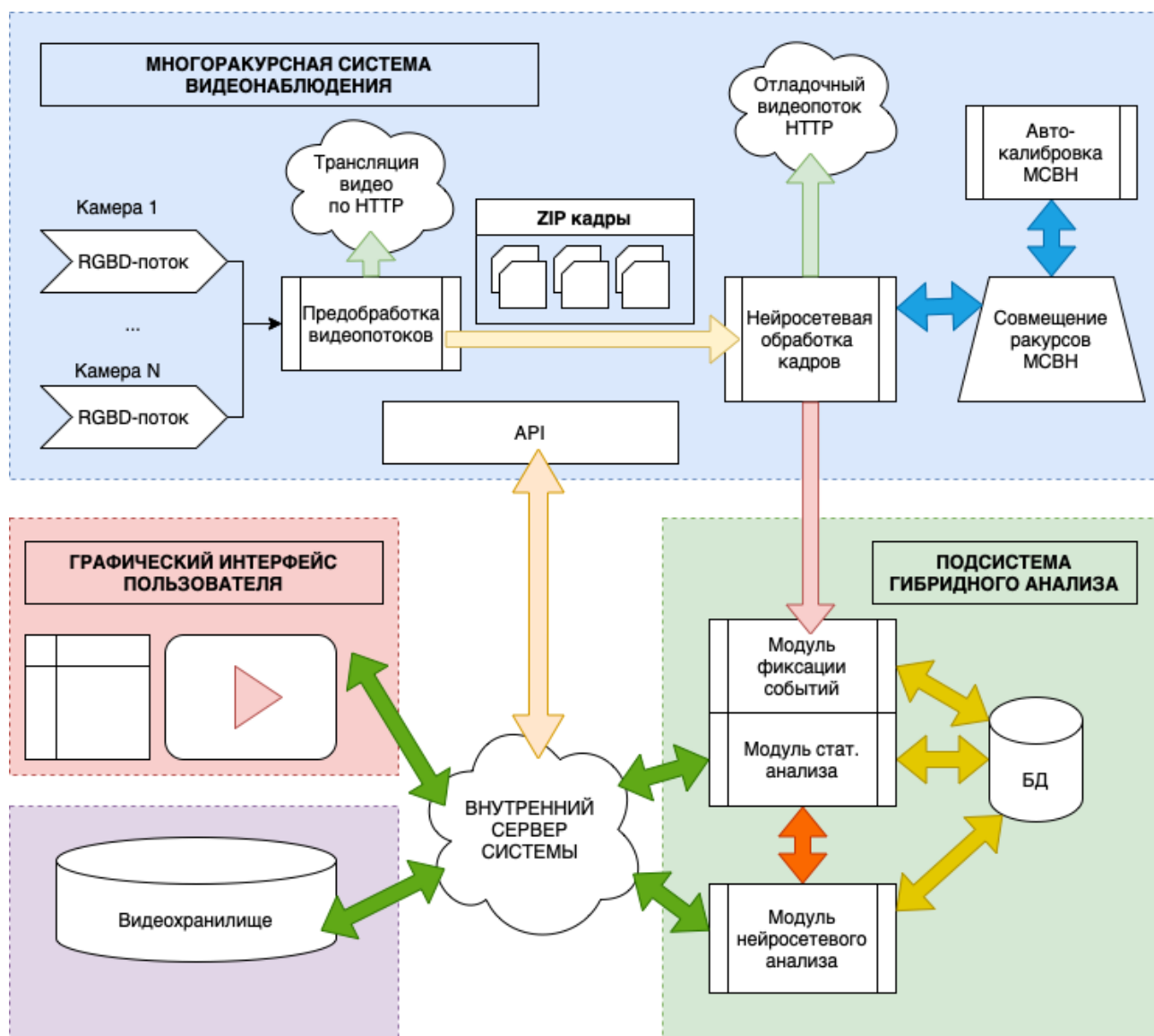


Рис. 1. Общая схема работы автономной системы многоракурсного нейросетевого анализа для автоматизации контроля производственных процессов, выполняемых руками

Используемый в данном проекте нейросетевой детектор определяет трехмерное расположение точек кистей рук относительно корневой точки (точки кисти, расположенной в основании запястья) с координатами $(0, 0, 0)$ по осям X, Y, Z . Для того, чтобы определить пространственное положение корневой точки относительно камеры наблюдения, используется информация из «карты глубины» для соответствующего кадра видеоизображения, с которого проводилась детекция ключевых точек кисти руки.

На рис. 2 приведена разметка результата распознавания ключевых точек кисти человеческой руки.

Определение ключевых точек скелета человека (помимо ключевых точек кистей рук) является необходимой частью математической модели системы по следующим причинам:

- 1) является наиболее достоверным признаком наличия человека (или нескольких) в кадре;
- 2) помогает решить проблемы с распознаванием «призрачных» рук, когда нейросетевой детектор «видит» кисть руки человека там, где ее на самом деле нет.

«Захват движения» подразумевает не только детекцию ключевых точек кистей рук и скелета человека, но и трекинг найденных объектов. Трекинг нужен для объединения информации о найденных объектах между кадрами. Это позволяет определять принадлежность найденных ключевых точек к одному и тому же объекту во времени и, соответственно, отслеживать его изменения и траекто-

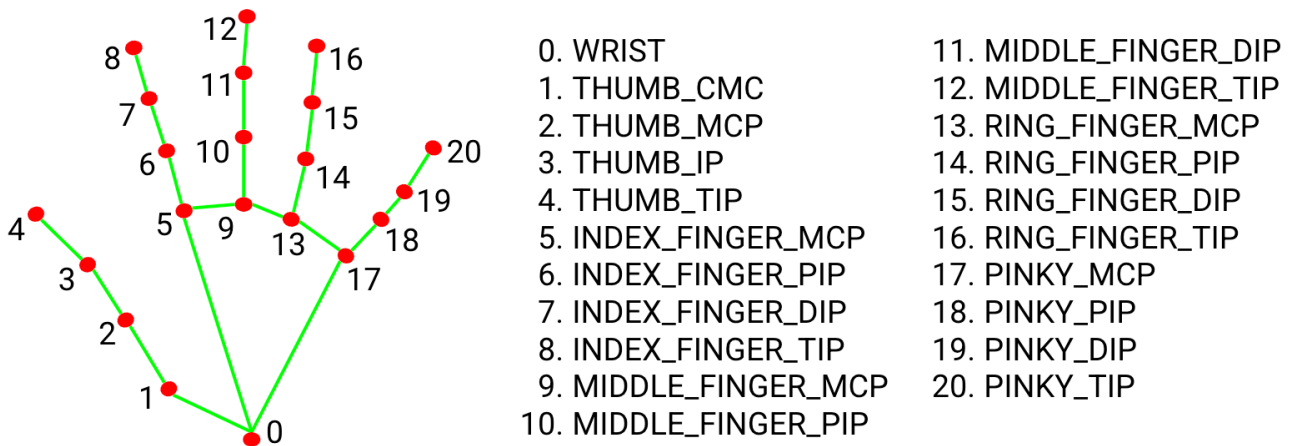


Рис. 2. Ключевые точки кисти руки при распознавании с помощью ИНС

рию движения.

Детекция лиц и сегментация людей необходимы для последующего определения таких событий, как прикосновение руки (кистей и пальцев рук) к телу и к лицу. Фиксация этих событий возможна при известном расположении в кадре лица человека, силуэта его тела, расположении рук и информации о расположении этих элементов в трехмерном пространстве, которую возможно получить из «карты глубины» каждого ракурса за счет использования стереокамер.

Автоматическая калибровка многоракурсной СВН

Под автоматической калибровкой многоракурсной СВН подразумевается определение расположения камер видеонаблюдения относительно друг друга в трехмерном пространстве, производимого без ручного вмешательства. Для выполнения этой операции был разработан авторский метод нахождения их относительного расположения на основании наблюдения за одним и тем же объектом — в данном случае за руками человека.

Рассмотрим выполнение автоматической калибровки на примере двух стереокамер, следящих за руками сотрудника с разных ракурсов наблюдения.

Операция «захвата движения», выполненная для синхронных кадров с обеих камер, дает нам расположение ключевых точек кистей рук.

Пусть одна камера видит одну из двух рук, вторая видит две. Необходимо найти соответствие рук на двух ракурсах. Для этого выполняется поворот трехмерной модели скелета руки (то есть набора ключевых точек кисти руки в трехмерных координатах относительно корневой точки). Когда все найденные модели скелетов кистей рук на всех ракурсах сориентированы одинаковым образом, производится попарное сравнение этих моделей с помощью операции нахождения геометрической дистанции одной модели от другой. Минимальная (в идеальном случае — нулевая, на практике — имеющая наиболее близкое к нулю значение) дистанция говорит о том, что сравниваемые модели описывают одну и ту же руку. При том, что сравниваются модели с разных ракурсов наблюдения, устанавливается соответствие между ними.

При любом количестве рук, видимых с разных ракурсов, производится та же самая операция поиска пар. После нахождения всех пар определяются координаты корневых точек каждой модели по информации о глубине изображения.

Полученная информация об удаленности моделей скелетов кистей рук от каждого ракурса наблюдения совмещается с информацией об углах поворота каждой модели от разных камер (углы получены в процессе ориентирования модели по осям), в результате чего вычисляется расположение и ориентация каждой камеры относительно каждой модели скелета руки.

В зависимости от того, сколько рук являются видимыми на каждом ракурсе и какие пары моделей скелетов кистей рук будут найдены, для каждой камеры будут получены от одного до нескольких наборов координат в трехмерном пространстве. Если наборов несколько, то производится усреднение для получения более точного значения.

В результате описанных выше вычислений получают точные результаты относительного рас-

положения камер в трехмерном пространстве, на основании которых можно выполнять дальнейшие расчеты.

Автоматическая калибровка многоракурсной системы видеонаблюдения выполняется с определенной периодичностью, задаваемой настройками системы.

Объединение информации с разных ракурсов наблюдения для получения полных и непрерывных данных о расположении ключевых точек рук человека

Откалиброванная многоракурсная система видеонаблюдения позволяет корректировать расположение в пространстве обнаруженных ключевых точек кистей рук человека.

С каждого ракурса система определяет расположение ключевых точек кистей рук относительно конкретной стереокамеры, а данные калибровки позволяют объединить эти данные в одно трехмерное пространство и провести усреднение координат каждой точки. В итоге мы получаем более точные значения о расположении «скелетов» рук человека для случаев, когда каждый ракурс видит только часть картины и не видит другой стороны.

Работа подсистемы гибридного анализа действий, выполняемых руками

Работа данной подсистемы обеспечивает:

1) фиксацию событий на основании данных, полученных от многоракурсной системы видеонаблюдения:

- распознавание события «наличие рук нескольких человек на одном рабочем месте»;
- распознавание события «рука вне поля зрения видеокамер»;
- распознавание события «рука сотрудника касается лица»;
- распознавание события «рука сотрудника касается тела»;
- распознавание события «движения глаз по сторонам без поворота головы»;
- определение события, когда рядом с рабочим местом отсутствуют люди (пустое рабочее место);
- определения движения рядом с пустым рабочим местом;
- распознавание действий, создающих риск утраты продукции на основании определения жестов рук сотрудника:
 - рука, сжатая в кулак;
 - не видно крайних фаланг правой руки;
 - не видно крайних фаланг левой руки;
 - пальцы правой руки сгруппированы;
 - пальцы левой руки сгруппированы;
 - плохо (частично) видна кисть правой руки;
 - плохо (частично) видна кисть левой руки;

2) статистический анализ накопленных событий, который включает:

- подсчет зафиксированных жестов и событий для каждого работника;
- расчет пороговых значений числа зафиксированных событий для каждого работника на основе накопленной статистики для разных временных масштабов;
- формирование «цифрового образа» сотрудника на основе собранных данных, взвешенных по времени совершения (момента и длительности действия), и статусах зафиксированных действий и их последовательностей;
- формирование данных для отображения оператору в случае превышения пороговых значений по одному или нескольким критериям;

3) нейросетевой анализ «цифрового образа», включающий в себя:

- кодирование данных о входной взвешенной последовательности действий в числовой вектор;
- классификация полученного вектора в соответствии с векторами, полученными из «цифрового образа» паттернов поведения, и определение статуса наблюдаемых действий.

В системе также предусмотрен внутренний сервер, который может работать как на той же аппаратной платформе, что и МСВН, и система гибридного анализа, так и на отдельной платформе, если система сконфигурирована на несколько рабочих мест. Задача сервера — собирать данные со всех подключенных рабочих мест и ретранслировать их в графический интерфейс пользователя. А

также осуществлять обратную связь с вычислительными модулями на рабочих местах для управления запущенными на них системами.

Аппаратная часть прототипа программно-аппаратного комплекса автономной системы многокурсного нейросетевого анализа для автоматизации контроля производственных процессов, выполняемых руками

Прототип системы представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из вычислительного блока и двух корпусных стереокамер на штативах.

Вычислительный блок представляет собой одноплатный компьютер в пластмассово-металлическом корпусе. На этом компьютере запускается операционная система и работает вся программная часть прототипа, в том числе нейросетевые детекторы, использующие для быстрой работы графический процессор (GPU) данного компьютера.

Две стереокамеры прототипа являются зрительными сенсорами многокурсной видеоподсистемы, позволяющими получить цветное видеоизображение вместе с информацией о глубине для определения трехмерного расположения точек в наблюдаемой сцене.

Аппаратная часть комплекса состоит из следующих устройств:

- 1) две стереокамеры Intel RealSense 435;
- 2) вычислительный модуль Jetson AGX Xavier (система на модуле с графическим ускорителем и ядрами для ускорения работы нейросетей);
- 3) адаптер питания вычислительного модуля.

При оборудовании рабочего стола сотрудника должны быть соблюдены следующие требования:

- 1) устройства, входящие в состав программно-аппаратного комплекса, должны располагаться таким образом, чтобы не мешать действиям сотрудника при выполнении им рабочих обязанностей и не нарушать условий рабочего места (освещения, свободного пространства для работы);
- 2) камеры, входящие в состав программно-аппаратного комплекса, должны обеспечивать съемку рабочей зоны с разных ракурсов при условии, что руки сотрудника в ходе выполнения рабочих операций находятся преимущественно в пределах кадра каждой из камер.

Программная реализация

Программная часть прототипа состоит из подсистем, общающихся между собой путем передачи сообщений, содержащих различные данные: кадры видеопотоков, результаты «захвата движений» — расположение ключевых точек рук, результаты анализа действий сотрудника, сообщения о тревогах и т.д.

Каждая подсистема строится для выполнения ряда определенных задач и выполняет часть общего функционала всей системы:

- подсистема видеонаблюдения, предназначенная для видеосъемки каждого из рабочих мест с нескольких ракурсов; задача подсистемы — одновременная работа с видеопотоками стереокамер — получение цветных изображений, данных о глубине изображений;
- подсистема хранения данных предназначена для хранения видеозаписей и данных о событиях и объектах;
- подсистема видеоанализа предназначена для определения ключевых точек рук и тела на видеоизображении и осуществления на их основе: автоматической калибровки многокурсной системы, слияния информации с разных ракурсов, поиска и идентификации в видеозаписях различных событий;
- подсистема статистического анализа предназначена для сбора статистических данных по накопленным в системе событиям для каждого сотрудника и формирования «цифрового образа» паттернов поведения;
- подсистема нейросетевого анализа «цифрового образа» паттернов поведения;
- подсистема формирования пользовательского графического интерфейса предназначена для управления и настройки работы прототипа, отображения изображений подсистемы видеонаблюдения, а также для отображения результатов работы подсистем гибридного анализа (статистического и нейросетевого).

Каждая подсистема общается с другими путем передачи информационных сообщений с использованием программных брокеров сообщений и клиент-серверного взаимодействия по протоколу http.

Таким образом, программная архитектура прототипа представляет собой распределенную микросервисную архитектуру. В отличие от монолитной программной архитектуры, микросервисы имеют ряд преимуществ в построении разрабатываемой системы:

- позволяют распределять программную систему различным образом на аппаратных мощностях для эффективного распределения нагрузки;
- позволяют менять конфигурацию как программной, так и аппаратной частей в зависимости от требований клиента к составу и функционалу системы;
- позволяют заменять отдельные сервисы, убирать или добавлять новые функциональные блоки без нарушения работоспособности системы.

Выводы

В статье представлен впервые созданный прототип системы автоматизированного контроля производственных процессов, выполняемых руками. Система представляет собой программно-аппаратный комплекс, который осуществляет мониторинг рабочего места с нескольких ракурсов наблюдения и производит анализ зафиксированных событий на основе искусственного интеллекта, который позволяет выявить аномальные действия сотрудника или проверить корректность выполнения технологического процесса.

Результаты анализа событий представляют собой набор данных, содержащих разметку видеопотока, в котором указано время и тип зафиксированного события. Событие может представлять собой сообщение о нетипичных или подозрительных действиях сотрудника, а также об ошибках в процессе ручного труда.

Разработан уникальный алгоритм, позволяющий системе проводить автоматическую калибровку «на ходу» без участия человека и специальных калибровочных шаблонов. Предлагаемый механизм автокалибровки многокамерной системы основан на одновременном наблюдении объектов сцены (например, ключевых точек на руках), определении их расположения в пространстве относительно каждой камеры (за счет карт глубины изображения, получаемых благодаря использованию стереокамер) и математическом решении задачи совмещения нескольких ракурсов. В результате решения этой задачи система определяет относительное расположение камер в трехмерном пространстве, в чем и состоит задача калибровки многокамерной системы.

В этом состоит авторское научно-техническое решение, которое не только позволяет менять количество ракурсов «на ходу», но и сохраняет систему работоспособной при случайном или намеренном сдвиге одной или нескольких камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. LeapMotion. Что внутри? *Хабр*. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/avi/articles/199230/>.
2. Kwon T., Tekin B., Stuhmer J., Bogo F., Pollefeys M. H2O: Two Hands Manipulating Objects for First Person Interaction Recognition. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2021. Режим доступа: <https://taeinkwon.com/projects/h2o/>.
3. Romeo L., Marani R., Perri A.G., D'Orazio T. Microsoft Azure Kinect Calibration for Three-Dimensional Dense Point Clouds and Reliable Skeletons. *Sensors*. 2022;22:4986. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s22134986>.
4. Bu S., Lee S. Easy to Calibrate: Marker-Less Calibration of Multiview Azure Kinect. *Comput. Model. Eng. Sci.* 2023;136(3):3083-3096. Режим доступа: <https://doi.org/10.32604/cmesci.2023.024460>.
5. Pätzold B., Bultmann S., Behnke S. Online Marker-Free Extrinsic Camera Calibration Using Person Keypoint Detections. *DAGM German Conference on Pattern Recognition (GCPR)*. Konstanz, Germany. 2022. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/363540896_Online_Marker-free_Extrinsic_Camera_Calibration_using_Person_Keypoint_Detections.
6. Liu H., Wu J., He R. Center Point to Pose: Multiple Views 3D Human Pose Estimation for Multi-Person. *PLoS ONE*. 2022;17(9):e0274450. DOI: 10.1371/journal.pone.0274450. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/363541752_Center_point_to_pose_Multiple_views_3D_human_pose_estimation_for_multi-person.
7. Yoon H., Jang M., Huh J., Kang J., Lee S. Multiple Sensor Synchronization with the Realsense RGB-D Camera. *Sensors*. 2021;21(18):6276. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s21186276>.

8. Jeon J., Jung S., Lee E., Choi D., Myung H. Run Your Visual-Inertial Odometry on NVIDIA Jetson: Benchmark Tests on a Micro Aerial Vehicle. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021;6(3):5332-5339. DOI: 10.1109/LRA.2021.3075141. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9416140&isnumber=9399748>.
9. Boschi A., Salvetti F., Mazzia V., Chiaberge M. A Cost-Effective Person-Following System for Assistive Unmanned Vehicles with Deep Learning at the Edge. *Machines*. 2020;8(3):49. DOI: 10.3390/machines8030049. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/343948324_A_Cost-Effective_Person-Following_System_for_Assistive_Unmanned_Vehicles_with_Deep_Learning_at_the_Edge.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СО СТРУКТУРНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОСЛОЙНЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕГРЕССИЙ**М. П. Базилевский***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, mik2178@yandex.ru*

Аннотация: статья посвящена проблеме моделирования технических и социально-экономических систем, динамика которых трансформируется за счет структурных изменений, что приводит к модификации параметров описывающих эту динамику трендов. Сформулирована трендовая модель многослойной модульной регрессии. Задача ее идентификации с помощью метода наименьших модулей формализована в виде задачи частично-булевого линейного программирования. С помощью предложенных моделей решено 3 задачи моделирования по временным рядам, содержащим тенденцию со структурными изменениями. Первая задача решена по данным о численности населения в Иркутской области, вторая и третья — по данным о грузовых и пассажирских железнодорожных перевозках. Построенные многослойные модульные регрессии, в отличие от линейных трендов, успешно выявили абсолютно все скрытые структурные изменения. Графически проиллюстрировано, как улучшается качество аппроксимации трендовых регрессий с ростом количества их слоев. Наиболее адекватные модели для каждой задачи были представлены в виде кусочно-заданных функций, что позволило дать им содержательную интерпретацию. Достоинство трендовых многослойных модульных регрессий в том, что на этапе оценивания автоматически определяются моменты времени, в которых меняется направление трендов.

Ключевые слова: регрессионный анализ, трендовая модель, многослойная модульная регрессия, интерпретация, метод наименьших модулей, задача частично-булевого линейного программирования, численность населения, железнодорожные перевозки.

Для цитирования: Базилевский М. П. Моделирование тенденций временных рядов со структурными изменениями с помощью многослойных модульных регрессий. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):34–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-04.

*Поступила в редакцию: 10.07.2024.**В окончательном варианте: 09.08.2024.***MODELING TIME SERIES TRENDS WITH STRUCTURAL CHANGES USING MULTILAYER MODULAR REGRESSIONS****M. P. Bazilevskiy***Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3253-5697>, mik2178@yandex.ru*

Abstract: this study addresses the challenge of modeling technical and socio-economic systems whose dynamics evolve due to structural changes, resulting in shifts in the parameters of the trends that describe these dynamics. A trend model based on multilayer modular regression is proposed. The identification problem is formalized as a mixed 0-1 integer linear programming problem, solved using the least absolute deviations method. The efficacy of the proposed models is demonstrated through three case studies using time series that exhibit structural changes in their trends. The first case study focuses on population data from the Irkutsk region, while the second and third analyze freight and passenger rail transportation data. Unlike linear trend models, the multilayer modular regressions successfully identified all latent structural changes. Graphical illustrations demonstrate how increasing the number of regression layers enhances the quality of trend approximation. The most appropriate models for each case are presented as piecewise functions, enabling a meaningful interpretation of the results. The primary advantage of multilayer modular trend regressions is their ability to automatically detect time points at which trend directions change during the estimation process.

Keywords: regression analysis, trend model, multilayer modular regression, interpretation, least absolute deviations method, mixed 0-1 integer linear programming problem, population, railway transportation.

Cite this article: Bazilevskiy M. P. Modeling Time Series Trends with Structural Changes using Multilayer Modular Regressions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):34–41. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-04.

Original article submitted: 10.07.2024.

Revision submitted: 09.08.2024.

Введение

Разработка новых и совершенствование существующих инструментов регрессионного анализа [1], относящегося к области машинного обучения [2], представляет собой актуальную научную задачу. При наличии выборки статистических данных регрессионный анализ традиционно начинается с выбора структурной спецификации модели, т. е. с поиска математической формы связи между переменными. К самым известным регрессионным моделям, с помощью которых успешно решаются разнообразные задачи анализа данных, можно отнести линейную [3], полиномиальную [4], степенную (производственную функцию Кобба–Дугласа) [5, 6] регрессии. Очень часто для построения той или иной регрессионной зависимости применяется аппарат математического программирования (см., например, [7, 8]). Например, с использованием такого аппарата легко могут быть найдены оценки неизвестных параметров производственной функции Леонтьева [9, 10].

Особое место среди структурных спецификаций в регрессионном анализе занимают неэлементарные регрессионные модели [11–15]. Например, в [11] предложена неэлементарная регрессия с мультиарными операциями $\min$ и $\max$, обобщающая как линейную регрессию, так и производственную функцию Леонтьева. В [12] введена модульная регрессия, в которой, как следует из названия, входные переменные преобразуются с помощью операции модуль числа. Там же предложен алгоритм ее оценивания с помощью метода наименьших модулей (МНМ), а в [13] — с помощью метода наименьших квадратов. В [14] рассмотрены модульные регрессии с мультиарной операцией модуль, на основе которых в [15] введены многослойные модульные регрессии (ММР), сконструированные по принципу «модуль в модуле». Там же задача оценивания ММР с помощью МНМ была формализована в виде задачи частично-булевого линейного программирования (ЧБЛП).

Как отмечено в [16] со ссылкой на известный учебник по эконометрике И. И. Елисеевой, при функционировании сложных технических и социально-экономических систем за счет структурных изменений или иных факторов может меняться характер их динамики, что приводит к изменению описывающих эту динамику параметров тренда. В такой ситуации предлагается использовать, например, статистический тест Г. Чоу [17, 18], состоящий в выборе между единым уравнением тренда и кусочно-линейной функцией, либо статистический тест Д. Гуярати [19], основанный на включении в модель регрессии одной или нескольких фиктивных переменных. В обоих случаях проблема состоит в том, что заранее неизвестна точка переключения с одной зависимости на другую.

Модели ММР содержат в своей структуре модули, поэтому любую такую построенную регрессию можно представить в виде кусочно-заданной функции и дать ей интерпретацию. Получается, что при построении тренда со структурными изменениями с помощью ММР автоматически должны определяться точки переключения между уравнениями. В этой связи была сформулирована цель: доказать эффективность ММР при моделировании тенденций временных рядов со структурными изменениями.

Постановка задачи

Пусть имеется временной ряд, содержащий показания времени $t = 1, 2, \dots, n$ и соответствующие им уровни ряда y_t , $t = \overline{1, n}$, переменной y . Тогда трендовую модель p -слойной модульной регрессии, в соответствии с результатами работы [15], можно записать в виде:

$$y_t = \alpha_{0,p} + \alpha_{1,p} \cdot t + (-1)^{\Delta_p} \cdot |z_{t,p-1}| + \varepsilon_t, t = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$z_{t,k} = \alpha_{0,k} + \alpha_{1,k} \cdot t + (-1)^{\Delta_k} \cdot |z_{t,k-1}|, t = \overline{1, n}, k = \overline{1, p-1}, \quad (2)$$

$$z_{t,0} = \alpha_{0,0} + \alpha_{1,0} \cdot t, t = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $z_{t,k}$ — неизвестное выходное значение в момент времени t на k -м слое; $\alpha_{0,k}$, $\alpha_{1,k}$ — неизвестные параметры на k -м слое; бинарная переменная Δ_k может принимать значение 0, если на k -м слое перед операцией модуль стоит знак «+», и 1, если знак «−»; ε_t — ошибка аппроксимации в момент времени t на p -м слое.

Для нахождения оценок неизвестных параметров трендовой модели (1) – (3) с помощью МНМ требуется решить следующую задачу ЧБЛП:

$$\sum_{t=1}^n (g_t + h_t) \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$u_{t,0} - v_{t,0} = \alpha_{0,0} + \alpha_{1,0} \cdot t, t = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$u_{t,k} - v_{t,k} \leq \alpha_{0,k} + \alpha_{1,k} \cdot t + (-1)^{\varphi_{q,k}} (u_{t,k-1} + v_{t,k-1}) + M - M \cdot \sigma_q, \\ t = \overline{1, n}, k = \overline{1, p-1}, q = \overline{1, 2^p}, \quad (6)$$

$$u_{t,k} - v_{t,k} \geq \alpha_{0,k} + \alpha_{1,k} \cdot t + (-1)^{\varphi_{q,k}} (u_{t,k-1} + v_{t,k-1}) - M + M \cdot \sigma_q, \\ t = \overline{1, n}, k = \overline{1, p-1}, q = \overline{1, 2^p}, \quad (7)$$

$$y_t \leq \alpha_{0,p} + \alpha_{1,p} \cdot t + (-1)^{\varphi_{q,p}} (u_{t,p-1} + v_{t,p-1}) + g_t - h_t + M - M \cdot \sigma_q, \\ t = \overline{1, n}, q = \overline{1, 2^p}, \quad (8)$$

$$y_t \geq \alpha_{0,p} + \alpha_{1,p} \cdot t + (-1)^{\varphi_{q,p}} (u_{t,p-1} + v_{t,p-1}) + g_t - h_t - M + M \cdot \sigma_q, \\ t = \overline{1, n}, q = \overline{1, 2^p}, \quad (9)$$

$$\sigma_q \in \{0, 1\}, q = \overline{1, 2^p}, \quad (10)$$

$$\sum_{q=1}^{2^p} \sigma_q = 1, \quad (11)$$

$$u_{t,k} \leq M \cdot \delta_{t,k}, t = \overline{1, n}, k = \overline{0, p-1}, \quad (12)$$

$$v_{t,k} \leq M \cdot (1 - \delta_{t,k}), t = \overline{1, n}, k = \overline{0, p-1}, \quad (13)$$

$$\delta_{t,k} \in \{0, 1\}, t = \overline{1, n}, k = \overline{0, p-1}, \quad (14)$$

$$u_{t,k} \geq 0, v_{t,k} \geq 0, t = \overline{1, n}, k = \overline{0, p-1}, \quad (15)$$

$$g_t \geq 0, h_t \geq 0, t = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где $u_{t,k}, v_{t,k}$ — неотрицательные числа, разница между которыми равна выходному значению переменной $z_{t,k}$ в момент времени t на k -м слое, а сумма равна $|z_{t,k}|$, причем $u_{t,k} \cdot v_{t,k} = 0$; g_t, h_t — неотрицательные числа, разница между которыми равна остатку модели в момент времени t , а сумма равна модулю остатка, причем, $g_t \cdot h_t = 0$; M — большое положительное число; $\varphi_{q,k}$ — элементы матрицы Φ размера $2^p \times p$, строки которой содержат все комбинации размещений с повторениями из элементов множества $\{0, 1\}$ по p ; σ_q — бинарная переменная, которая равна 1, если знаки перед модулями в модели соответствуют q -й строке матрицы Φ , и 0 — в противном случае; $\delta_{t,k}$ — бинарная переменная, которая равна 1, если выходное значение переменной $z_{t,k} \geq 0$, и 0 — в противном случае.

Подчеркнем, что задача ЧБЛП (4) — (16) для трендовой ММР (1) — (3) представляет собой частный случай задачи ЧБЛП для ММР с несколькими объясняющими переменными, предложенной в [15].

Моделирование численности населения, а также грузовых и пассажирских перевозок с помощью трендовых моделей и по сей день актуально (см., например, [20, 21]). Однако делается это в основном с помощью линейных и параболических трендов.

Для демонстрации эффективности ММР (1) — (3) при моделировании тенденций временных рядов со структурными изменениями было решено использовать следующие временные ряды за период с 2000 по 2021 годы:

y_1 — численность населения (тысяч человек);

y_2 — отправление грузов железнодорожным транспортом общего пользования (млн тонн);

y_3 — отправление пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования (тысяч человек).

В качестве показаний времени выбраны моменты $t = 1, 2, \dots, 22$. Например, момент времени $t = 1$ означает 2000 год, а $t = 22$ — 2021 год.

Эти временные ряды характеризуют социально-экономическое положение Иркутской области и содержатся в базах данных Федеральной службы государственной статистики (<https://rosstat.gov.ru/>).

Была поставлена задача провести 3 эксперимента: для каждого временного ряда построить с помощью МНМ простой линейный тренд, а также трендовую однослойную и двухслойную модульную регрессию. При этом для каждого случая провести фиксацию уравнения регрессии, времени T решения задачи ЧБЛП в секундах, величины суммы модулей остатков $J = \sum_{t=1}^{22} |e_t|$, а также построить графики наблюдаемых и прогнозных по модели значений зависимых переменных, выбрать наиболее адекватную регрессию и интерпретировать ее.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для решения задач ЧБЛП (4) — (16) был использован оптимизационный пакет LPSolve IDE. Большое число M в этих задачах неизменно и составило 100000. Линейные тренды оценивались с помощью эконометрического пакета Gretl. Все вычисления проводились на стандартном персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 3 4300U (2,70 ГГц) и объемом оперативной памяти 16 Гб.

Эксперимент №1. При моделировании численности населения был идентифицирован линейный тренд вида:

$$\tilde{y}_1 = 2561,33 - 9,2833 \cdot t, \quad (17)$$

однослойная модульная регрессия вида:

$$\tilde{y}_1 = 2571,94 - 15,77 \cdot t + |z_0|, \quad (18)$$

$$z_0 = 80,54 - 10,67 \cdot t \quad (19)$$

и двухслойная модульная регрессия вида:

$$\tilde{y}_1 = 2640,298412 - 12,273412 \cdot t - |z_1|, \quad (20)$$

$$z_1 = -66,16369 - 3,886309 \cdot t + |z_0|, \quad (21)$$

$$z_0 = 86,290277 - 11,415277 \cdot t. \quad (22)$$

Для модели (17) $T = 0,001$ сек., $J = 489,0167$, для (18)–(19) $T = 0,206$ сек., $J = 92,12$, для (20)–(22) $T = 1394,408$ сек., $J = 52,0663$.

Для построения графиков удобнее представить иерархическую структуру (18)–(19) в виде:

$$\tilde{y}_1 = 2571,94 - 15,77 \cdot t + |80,54 - 10,67 \cdot t|, \quad (23)$$

а (20)–(22) в виде:

$$\tilde{y}_1 = 2640,298 - 12,27341 \cdot t - |-66,163 - 3,88631 \cdot t + |86,29 - 11,41528 \cdot t||. \quad (24)$$

Графики функций (17), (23) и (24) на отрезках $t \in [0, 23]$ отражены сплошными линиями на рисунках 1а, 1б и 1в соответственно. На тех же рисунках точками обозначены наблюдаемые значения переменной y_1 . По рисунку 1 видно, что временной ряд y_1 имеет тенденцию со структурными изменениями, поэтому применение линейного тренда дает плохие результаты (рис. 1а). Однослойная модульная регрессия (рис. 1б) дает неплохие результаты при $t \in [1, 20]$, но при $t = 21$ и $t = 22$, по-видимому, снова начинаются структурные изменения, и одного слоя уже не хватает для адекватного описания динамики. Двухслойная модульная регрессия (рис. 1в) все структурные изменения выявила очень точно, поэтому было решено интерпретировать именно ее.

Для этого уравнение (24) было представлено в виде кусочно-заданной функции:

$$\tilde{y}_1 = \begin{cases} 2620,171 + 3,02818 \cdot t, & \text{если } t \leq 1,315, \\ 2660,425 - 27,575 \cdot t, & \text{если } 1,315 < t \leq 7,559, \\ 2487,845 - 4,74444 \cdot t, & \text{если } 7,559 < t < 20,249, \\ 2792,751 - 19,80238 \cdot t, & \text{если } t \geq 20,249. \end{cases}$$

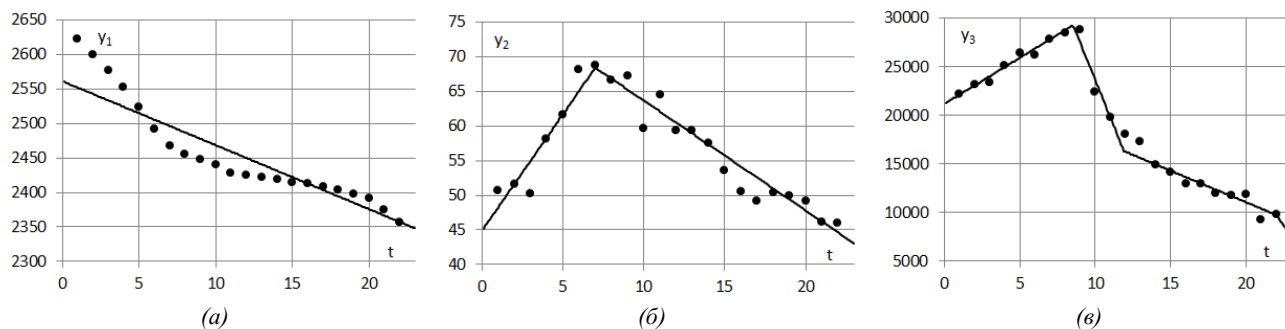


Рис. 1. Графики трендов временного ряда y_1

Тогда справедливы следующие выводы. С начала 2000 года по июнь-июль 2006 года численность населения Иркутской области убывала по закону $2660,425 - 27,575 \cdot t$, т. е. в год примерно на 27,575 тыс. чел., с июня-июля 2006 года по февраль-март 2019 года скорость убывания замедлилась и составила примерно 4,744 тыс. чел. в год, а с февраля-марта 2019 года скорость убывания снова выросла примерно по 19,802 тыс. чел. в год.

Эксперимент №2. При моделировании грузоперевозок был идентифицирован линейный тренд вида:

$$\bar{y}_2 = 67,1 - 0,9 \cdot t, \quad (25)$$

однослойная модульная регрессия вида:

$$\bar{y}_2 = 62,20833 + 0,88928 \cdot t - |17,34166 - 2,47738 \cdot t|, \quad (26)$$

двухслойная модульная регрессия вида:

$$\bar{y}_2 = 56,125 + 2,17976 \cdot t - |0,13452 - 6,35119 \cdot t + |23,95952 - 10,13809 \cdot t||. \quad (27)$$

Для модели (25) $T = 0,001$ сек., $J = 106,4$, для (26) $T = 40,509$ сек., $J = 34,2238$, для (27) $T = 1010,048$ сек., $J = 26,25238$.

Графики функций (25)–(27) и наблюдаемые значения переменной y_2 отражены на рисунках 2а, 2б и 2в соответственно. По рисунку 2 видно, что тенденция временного ряда y_2 содержит структурные изменения, поэтому применение линейного тренда дает плохие результаты (рис. 2а). Однослойная модульная регрессия (рис. 2б) безупречно выявила структурные изменения. Применение двухслойной модульной регрессии (рис. 2в), судя по всему, из-за переобучения, приводит к нестабильности прогнозов при $t = 1, t = 2, t = 3$. Поэтому решено интерпретировать однослойную регрессию (26).

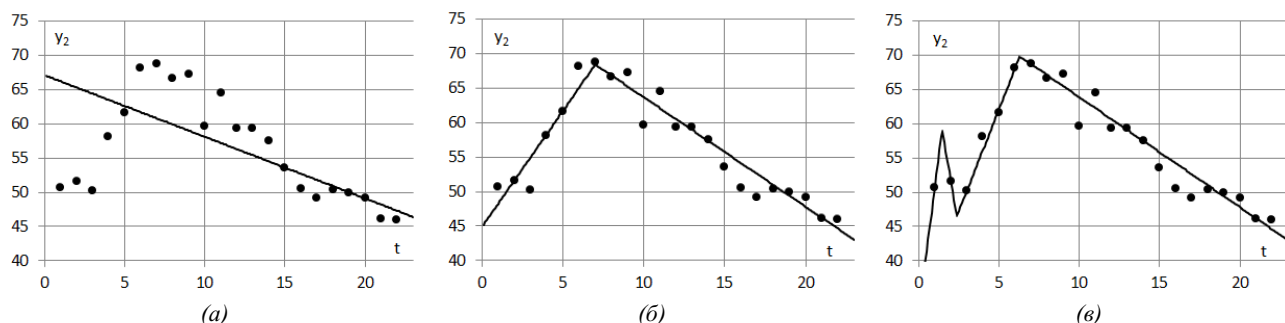


Рис. 2. Графики трендов временного ряда y_2

Уравнение (26) в виде кусочно-заданной функции имеет вид:

$$\bar{y}_2 = \begin{cases} 44,86666 + 3,36666 \cdot t, & \text{если } t \leq 7, \\ 79,55 - 1,5881 \cdot t, & \text{если } t > 7. \end{cases}$$

Из этого следует, что до 2006 года отправление грузов железнодорожным транспортом общего пользования в Иркутской области возрастало по закону $44,8666 + 3,3666 \cdot t$, т. е. примерно на 3,3666 млн тонн в год, а с 2006 года тенденция сменилась в противоположную сторону: грузовые перевозки убывают со скоростью примерно 1,5881 млн тонн в год.

Эксперимент №3. При моделировании перевозок пассажиров был идентифицирован линейный тренд вида:

$$\tilde{y}_3 = 28795,6 - 894,714 \cdot t, \quad (28)$$

однослойная модульная регрессия вида:

$$\tilde{y}_3 = 27213,25 - 55,75 \cdot t - |6155,75 - 1131,25 \cdot t|, \quad (29)$$

двухслойная модульная регрессия вида:

$$\tilde{y}_3 = 41623,3333 - 1448,469696 \cdot t - |1415,86666 - 797,76666 \cdot t + |19021,8 - 1598,03636 \cdot t||. \quad (30)$$

Для модели (28) $T = 0,001$ сек., $J = 48701$, для (29) $T = 13,587$ сек., $J = 29264$, для (30) $T = 4215,317$ сек., $J = 11558,127$.

Графики функций (28)–(30) и наблюдаемые значения переменной y_3 отражены на рисунках 3а, 3б и 3в соответственно. На рисунке 3 снова наблюдаются структурные изменения тенденции временного ряда y_3 , поэтому применение линейного тренда дает плохие результаты (рис. 3а). Те же результаты дает однослойная модульная регрессия (рис. 3б). А двухслойная модульная регрессия (рис. 3в) выявила абсолютно все структурные изменения, поэтому была подвергнута интерпретации.

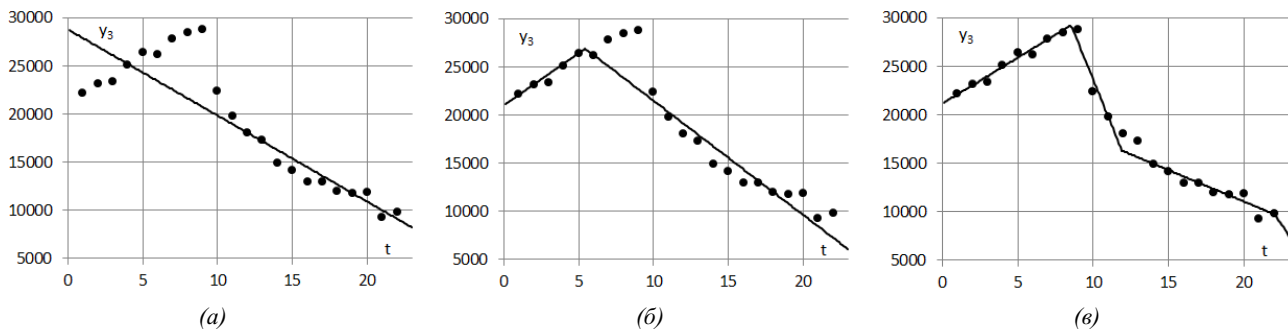


Рис. 3. Графики трендов временного ряда y_3

Уравнение (30) в виде кусочно-заданной функции можно представить как:

$$\tilde{y}_3 = \begin{cases} 21185,66666 + 947,33333 \cdot t, & \text{если } t \leq 8,531, \\ 62061 - 3844,27271 \cdot t, & \text{если } 8,531 < t \leq 11,903, \\ 24017,4 - 648,2 \cdot t, & \text{если } 11,903 < t < 22, \\ 59229,26666 - 2248,73939 \cdot t, & \text{если } t \geq 22. \end{cases}$$

Тогда справедливы следующие заключения. С начала 2000 года по июнь–июль 2007 года отправление пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования в Иркутской области возрастало по закону $21185,666 + 947,333 \cdot t$, т. е. в год примерно на 947,333 тыс. чел., с июня–июля 2007 года по октябрь–ноябрь 2010 года возрастание сменилось на убывание со скоростью примерно 3844,273 тыс. чел. в год, а с октября–ноября 2010 года по 2021 год скорость убывания уменьшилась примерно до 648,2 тыс. чел. в год.

Заключение

В статье впервые сформулирована трендовая ММР. Задача ее оценивания с помощью МНМ формализована в виде задачи ЧБЛП. Трендовая ММР применена для моделирования тенденций временных рядов со структурными изменениями. При этом решены задачи моделирования численности

населения, отправления грузов и пассажиров железнодорожным транспортом в Иркутской области. Во всех задачах трендовые ММР успешно выявили абсолютно все структурные изменения. При этом, в отличие от статистических тестов Г. Чоу и Д. Гуйарати, при оценивании модульных регрессий автоматически идентифицируются точки переключения кусочно-заданных функций. Дана интерпретация построенных моделей. Эксперименты показали, что чем больше слоев в ММР, тем точнее модель, но время ее оценивания существенно увеличивается. Однако большое число слоев может приводить к переобучению модели. Таким образом, доказана эффективность ММР при моделировании тенденций временных рядов со структурными изменениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons; 2021.
2. Molnar C. *Interpretable machine learning*. Lulu.com; 2020.
3. Maulud D., Abdulazeez A. M. A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*. 2020;1(2):140–147. DOI: 10.38094/jastt1457.
4. Tsai C. Y., Kim J., Jin F., Jun M., Cheong M., Yammarino F. J. Polynomial Regression Analysis and Response Surface Methodology in Leadership Research. *The Leadership Quarterly*. 2022;33(1):101592. DOI: 10.1016/j.leaqua.2021.101592.
5. Sharma A., Chaudhary N. Prediction of Software Effort by Using Non-Linear Power Regression for Heterogeneous Projects Based on Use Case Points and Lines of Code. *Procedia Computer Science*. 2023;218:1601–1611. DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.138.
6. Başeğmez H. Estimation of Cobb–Douglas Production Function for Developing Countries. *Journal of Research in Business*. 2021;6(1):54–68. DOI: 10.29228/JRB.3.
7. Chung S., Park Y. W., Cheong T. A Mathematical Programming Approach for Integrated Multiple Linear Regression Subset Selection and Validation. *Pattern Recognition*. 2020;108:107565. DOI: 10.1016/j.patcog.2020.107565.
8. Park Y. W., Klabjan D. Subset Selection for Multiple Linear Regression Via Optimization. *Journal of Global Optimization*. 2020;77(3):543–574. DOI: 10.1007/s10898-020-00876-1.
9. Клейнер Г. Б. *Производственные функции: Теория, методы, применение*. М.: Финансы и статистика; 1986. 239 с.
10. Носков С. И. *Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных*. Иркутск: Облформпечать; 1996. 321 с.
11. Базилевский М. П. Обобщение неэлементарных линейных регрессий. *Моделирование и анализ данных*. 2023;13(2):85–98. DOI: 10.17759/mda.2023130205.
12. Базилевский М. П., Ойдопова А. Б. Оценивание модульных линейных регрессионных моделей с помощью метода наименьших модулей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2023;(45):130–146. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.06.
13. Базилевский М. П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2023;3:136–146. DOI: 10.25729/ESI.2023.31.3.013.
14. Базилевский М. П. Оценивание регрессионных моделей с мультиарной операцией модуль методом наименьших модулей. *Инженерный вестник Дона*. 2024;(5). Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/r/magazine/archive/n5y2024/9188>.
15. Базилевский М. П. Оценивание неизвестных параметров многослойной модульной регрессии методом наименьших модулей. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). Режим доступа: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1581>.
16. Афанасьева О. В., Колесниченко С. В., Новожилов И. М. Теоретические аспекты анализа структурных сдвигов при исследовании процессов динамики сложных технических и социально-экономических систем. *Инновации*. 2018;10:108–112.
17. Боченина М. В. Прогнозирование цен на рынке жилья в условиях изменения основной тенденции. *Теория и практика общественного развития*. 2023;8:137–142. DOI: 10.24158/tipor.2023.8.16.

18. Голованов О. А., Тырсин А. Н., Васильева Е. В. Оценка влияния пандемии COVID-19 на тренды социально-экономического развития региона России: кейс Свердловской области. *Journal of Applied Economic Research*. 2022;21(2):257–281. DOI: 10.15826/vestnik.2022.21.2.010.
19. Gujarati D. N. *Essentials of econometrics*. Sage Publications; 2021.
20. Архангельская Л. Ю., Жалнина И. Н. Комплексный структурно-динамический анализ движения численности населения Воронежской области за 2017–2021 годы. *Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета*. 2023;13(5):104–113. DOI: 10.26794/2226-7867-2023-13-5-104-113.
21. Домнина О. Л., Шалаева Ж. Ю. Прогнозирование объемов перевозок пассажиров внутренним водным транспортом. *Научные проблемы водного транспорта*. 2022;72:102–110.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТА К ОСНОВАНИЮ КОРПУСА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА**А. Р. Шахмаева^{1,а}, С. У. Увайсов^{2,б}, Э. Казалиева^{3,в}**¹ Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Российская Федерация² МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация³ Институт физики им. Амирханова ДФИЦ РАН, г. Махачкала, Российская Федерация^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2372-9043>, ifpk12@mail.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, uvajsov@mirea.ru^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6866-5357>, kazanova.em@mail.ru

Аннотация: проведено математическое моделирование теплофизических процессов при сборке мощного биполярного транзистора в корпус прибора. Рассмотрена структура транзистора и характеристики ее элементов. Определено температурное поле транзистора. Для математического моделирования теплофизических процессов представлена система дифференциальных уравнений, описывающая температурное поле транзистора с начальными и граничными условиями. Решение системы дифференциальных уравнений получено численным методом конечных элементов, реализованным в пакете прикладных программ Elcut. Методика численного расчета температурного поля представлена решением дифференциальных уравнений частным производным, а также интегральных уравнений. В работе проведен численный эксперимент по модели мощного биполярного транзистора с учетом теплофизических параметров его областей. Для количественного анализа теплофизических процессов в структуре транзистора получены одномерные графики изменения температуры в областях биполярного транзистора. Результаты расчетов представлены в виде двумерных температурных полей в поперечном сечении при изменении токов питания от 3 до 9 А для предлагаемого слоя металлизации обратной стороны структуры транзистора в виде композиции из металлов хром–никель–олово–серебро и для слоя хром–никель, применяемого по базовой технологии при изготовлении исследуемого транзистора. Представлены графики изменения температуры вдоль оси слоя металлизации для вариантов напыления хром–никель–олово–серебро и хром–никель при различных значениях токов питания. Расчет теплового сопротивления показал меньшие значения для металлизации композиции хром–никель–олово–серебро в сравнении с металлизацией хром–никель по базовой технологии.

Ключевые слова: мощный транзистор, кристалл, корпус, температура, припой, металлизация, контакт.

Для цитирования: Шахмаева А. Р., Увайсов С. У., Казалиева Э. Математическое моделирование теплофизических процессов при формировании контакта к основанию корпуса полупроводникового прибора. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):42–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05.

Поступила в редакцию: 02.08.2024.

В окончательном варианте: 03.09.2024.

SIMULATION OF THERMOPHYSICAL PROCESSES DURING THE MANUFACTURING OF A SEMICONDUCTOR DEVICE HOUSING CONTACT**A. R. Shakhmaeva^{1,а}, S. U. Uvaysov^{2,б}, E. Kazalieva^{3,в}**¹ Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation² MIREA — Russian University of Technology, Moscow, Russian Federation³ Amirkhanov Institute of Physics, DFRC RAS, Makhachkala, Russian Federation^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2372-9043>, ifpk12@mail.ru^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, uvajsov@mirea.ru^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6866-5357>, kazanova.em@mail.ru

Abstract: this paper presents a simulation of thermophysical processes during the assembly of a high-power bipolar transistor into its housing. The structure of the transistor and the characteristics of its structural elements are examined, and the temperature field of the transistor is determined. A system

of differential equations describing the temperature field, along with initial and boundary conditions, is formulated for the simulation of these thermophysical processes.

The solution to this system of differential equations is obtained using the numerical finite element method implemented in the Elcut application software package. The numerical calculation of the temperature field involves solving partial differential equations as well as integral equations. A numerical experiment based on a model of a high-power bipolar transistor is conducted, taking into account the thermophysical parameters of its regions.

For a quantitative analysis of the thermophysical processes in the transistor structure, one-dimensional graphs illustrating temperature variations in the regions of the bipolar transistor are presented. The results are displayed as two-dimensional temperature fields in cross-section, with supply currents varying from 3 to 9 A, for the proposed metallization layer on the reverse side of the transistor structure, which consists of a chromium-nickel-tin-silver composition, as well as for the chromium-nickel layer used in the conventional manufacturing process of the studied transistor. Graphs depicting temperature changes along the axis of the metallization layer for both the chromium-nickel-tin-silver and chromium-nickel deposition methods at different supply currents are included. The simulation of thermal resistance demonstrates lower values for the chromium-nickel-tin-silver metallization compared to the conventional chromium-nickel approach.

Keywords: high-power transistor, crystal, housing, temperature, solder, metallization, contact.

Cite this article: Shakhmaeva A. R., Uvaysov S. U., Kazalieva E. Simulation of Thermophysical Processes During the Manufacturing of a Semiconductor Device Housing Contact. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):42–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05.

Original article submitted: 02.08.2024.

Revision submitted: 03.09.2024.

Введение

Современная электроника сталкивается с задачей создания оптимальных тепловых условий для функционирования полупроводниковых приборов, поскольку с ростом выделяемой энергии этот аспект становится особенно актуальным с точки зрения безотказности в работе. Увеличение энерговыделения полупроводниковых приборов при работе в условиях высоких температур и других факторов негативно сказывается на параметрах надежности прибора [1–4].

Современные полупроводниковые приборы играют ключевую роль в генерации, усилении и преобразовании сигналов, особенно в мощных устройствах. Их используют в усилителях и источниках питания, где к ним предъявляются строгие требования по максимально допустимому напряжению, токам и мощности.

Если предельные значения тока и напряжения ограничены физическими свойствами кристалла, то максимальное выделение мощности зависит от температур, возникающих в кристалле и на границе «кристалл–корпус»

Задачей исследования является математическое моделирование теплофизических процессов при формировании контакта к основанию корпуса полупроводникового прибора с целью уменьшения теплового сопротивления.

Для исследования выбран мощный полупроводниковый прибор — биполярный мощный транзистор KT829, структура которого представлена на рисунке 1.

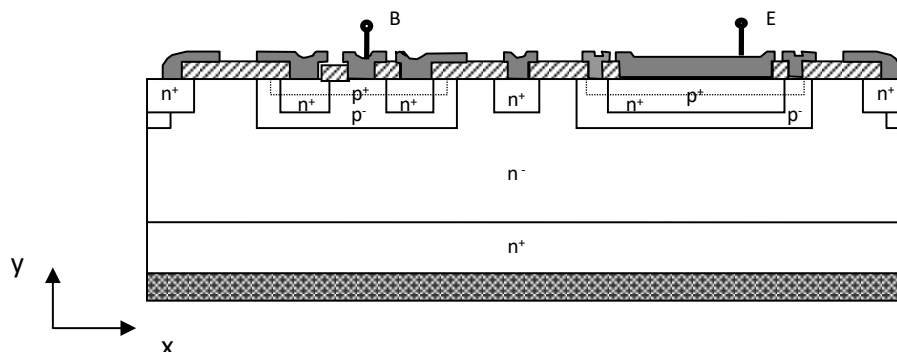


Рис. 1. Структура кристалла (боковой разрез) биполярного мощного транзистора KT829

Для его производства используются кремниевые пластины p - и n -типа, полученные эпитаксиальным способом, а металлизация обратной стороны структуры для формирования контакта к коллекторной области реализована на основе слоя из композиции металлов — хром–никель.

Нестационарное температурное поле биполярного транзистора в процессе его работы определяется системой дифференциальных уравнений, имеющей следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{n+} \left(\frac{\partial^2 T_{n+}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{n+}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{n+}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.n+} &= \rho_{n+} C_{n+} \frac{\partial T_{n+}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{n-} \left(\frac{\partial^2 T_{n-}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{n-}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{n-}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.n-} &= \rho_{n-} C_{n-} \frac{\partial T_{n-}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{p+} \left(\frac{\partial^2 T_{p+}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p+}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p+}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.p+} &= \rho_{p+} C_{p+} \frac{\partial T_{p+}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{p-} \left(\frac{\partial^2 T_{p-}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p-}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p-}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.p-} &= \rho_{p-} C_{p-} \frac{\partial T_{p-}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{m1} \left(\frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.m1} &= \rho_{m1} C_{m1} \frac{\partial T_{m1}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{m2} \left(\frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.m2} &= \rho_{m2} C_{m2} \frac{\partial T_{m2}}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные условия:

$$T_{n+} = T_{n-} = T_{p+} = T_{p-} = T_{m1} = T_{m2} = T_{ср} \text{ при } \tau = 0.$$

Граничные условия определяют наличие конвективного теплообмена по внешней поверхности биполярного транзистора, помимо его нижней поверхности, с окружающей средой в соответствии с законом Ньютона–Рихмана и равенство тепловых потоков на границах соприкосновения областей транзистора (n^+ , n^- , p^+ , p^- , металлизации) в соответствии с рисунком 1. Нижняя поверхность биполярного транзистора контактирует с посадочной площадкой выводной рамки корпуса через припой ПОС 5 (5% олово, 95% свинец).

Температурное поле в слое припоя и выводной рамки определяется на основе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \lambda_{пр} \left(\frac{\partial^2 T_{пр}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{пр}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{пр}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.пр} &= \rho_{пр} C_{пр} \frac{\partial T_{пр}}{\partial \tau}, \\ \lambda_{в.р} \left(\frac{\partial^2 T_{в.р}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{в.р}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{в.р}}{\partial z^2} \right) + Q_{Дж.в.р} &= \rho_{в.р} C_{в.р} \frac{\partial T_{в.р}}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия аналогичны (1), т. е.:

$$T_{пр} = T_{в.р} = T_{ср} \text{ при } \tau = 0,$$

а граничные условия определяют конвективный теплообмен по всей внешней поверхности структуры и равенство тепловых потоков на границе раздела областей припоя, металлизации и выводной рамки корпуса биполярного транзистора.

В соотношениях (1)–(2) обозначено: T — температура; λ — коэффициент теплопроводности; C — теплоемкость; ρ — плотность; x, y, z — координаты; τ — время; $Q_{Дж}$ — количество теплоты, выделяемое в единице объема в единицу времени в областях биполярного транзистора за счет теплоты Джоуля; индексы n^+ , n^- , p^+ , p^- , $m1$, $m2$, $пр$, $в.р$ — определяют область биполярного транзистора из полупроводников n - и p - типов, металлизации, припоя и выводной рамки; $T_{ср}$ — температура окружающей среды.

При расчете температурного поля силового биполярного транзистора по вышеприведенным соотношениям учитывается следующее:

- каждая из областей транзистора характеризуется постоянными значениями коэффициентов теплопроводности, теплоемкостью и плотностью, не зависящими от температуры;

- окружающая среда имеет одинаковую температуру во всех точках, а процесс теплообмена поверхности транзистора с ней осуществляется при постоянном коэффициенте теплоотдачи;
- все области биполярного транзистора имеют четкую границу раздела;
- удельное электрическое сопротивление областей биполярного транзистора определяется по формуле $\rho = \frac{2mv_T}{e^2 k_e \ell}$, где m — масса носителя заряда (электрона), v_T — средняя скорость теплового движения носителя заряда в материале, e — заряд электрона, k_e — концентрация носителей заряда в материале, ℓ — длина свободного пробега носителя заряда в материале, при этом теплота Джоуля вычисляется в соответствии с законом Джоуля–Ленца;
- влияние на теплообмен соседних к биполярному транзистору компонентов, входящих в состав электронной аппаратуры, в которой он используется, не учитывается.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) с заданными начальными и граничными условиями было получено при помощи численного метода конечных элементов [5–10], внедренного в программный пакет Elcut (разработчик — компания ООО «Тор», г. Санкт-Петербург), который выделяется высокой производительностью и быстротой обработки данных для подобных задач.

Результаты численного эксперимента

Численный эксперимент проводился по модели транзистора, изображенной на рисунке 2.

В ней обозначены 1 — область полупроводника, 2 — металлизация, 3 — припой, 4 — выводная рамка корпуса. Для упрощения расчетов и представления вычислительного материала область полупроводника представлена в виде объема, характеризующегося усредненными значениями плотности, электро- и теплофизических параметров.

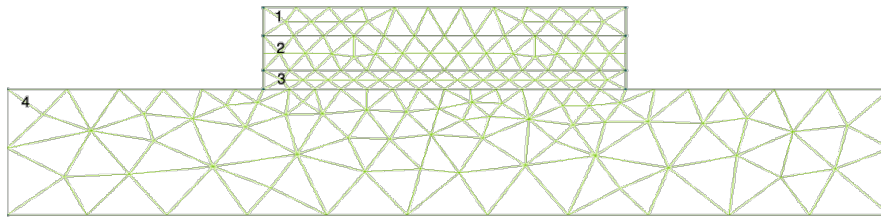


Рис. 2. Модель мощного биполярного транзистора

В рассматриваемой модели длина выводной рамки составляет 10 мм, полупроводника, металлизации и припоя — 4,1 мм, толщина выводной рамки — 2 мм, припоя — 0,3 мм, металлизации — 0,534 мм, полупроводника — 0,46 мм. Ширина всех структурных элементов равна 4,1 мм. Теплофизические характеристики материалов, используемых для формирования биполярного транзистора как в базовой технологии, так и в исследуемой в данной работе, представлены в таблице.

Температура окружающей среды принята равной 20°C, а коэффициент теплоотдачи — 5 Вт/(К·м²).

Таблица

Теплофизические параметры областей биполярного транзистора

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(К·моль)	Плотность, г/см³
кремний	159	712	2,33
хром	67,1	443	7,19
никель	92,5	440	8,902
олово	65,8	230	7,31
серебро	423	234	10,5
припой	35	130	11,3
медь	407	420	8,5

Результаты произведенных расчетов представлены на рисунках 3–8. На рисунках 3–4 показано двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для токов питания 3

А, 6 А и 9 А соответственно для исследуемого в работе транзистора со слоем металлизации в виде структуры хром–никель–олово–серебро (рис. 3) и для слоя хром–никель (рис. 4) в стационарном режиме. Рисунки показывают увеличение температуры от поверхностей к центру, которое обусловливается температурным обменом с окружающим пространством. При этом самая высокая температура на области кристалла, имеющей наибольшее электрическое сопротивление, а минимальная — выводной рамки, изготовленной из меди, имеющей низкую величину электрического сопротивления и относительно большие по сравнению с остальными составляющими биполярного транзистора областями габаритные размеры. Температура в слоях металлизации и припоя равномерно уменьшается в направлении выводной рамки.

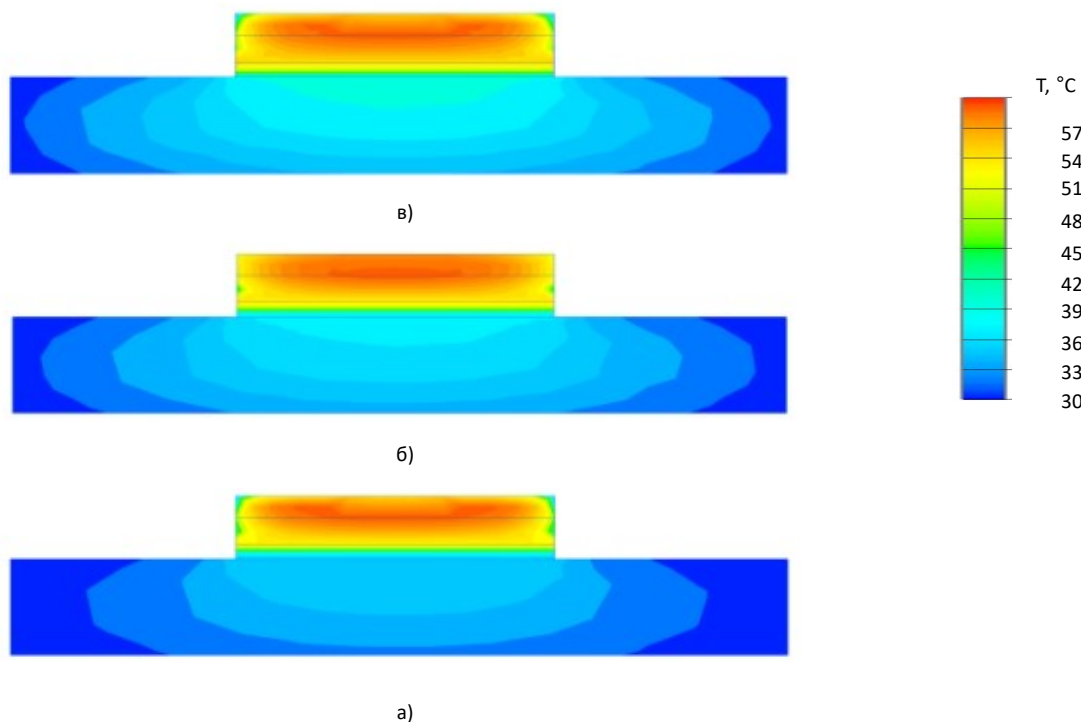


Рис. 3. Двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для различных токов питания при использовании слоя металлизации в виде структуры хром–никель–олово–серебро: а — 3 А, б — 6 А, в — 9 А

Согласно приведенным рисункам 3–4 температурных полей, температура во всех точках биполярного транзистора увеличивается с ростом силы тока питания. Данное обстоятельство очевидно и связано с ростом значения джоулевой теплоты, выделяемой в единице его объема, прямо пропорциональной квадрату силы тока питания.

Для количественного анализа теплофизических процессов в структуре биполярного транзистора получены одномерные графики изменения температуры в областях транзистора. Особенно важны зависимости изменения температуры по толщине слоя металлизации для различных вариантов его исполнения. На рисунках 5–6 представлены графики изменения температуры вдоль центральной оси слоя металлизации для исследуемых в работе вариантов металлизации (хром–никель–олово–серебро и хром–никель). Зависимости получены при силе тока питания мощного биполярного транзистора, равной 3 А, 6 А и 9 А.

Согласно представленным графикам, максимальный перепад температур по толщине слоя металлизации для слоев хром–никель и хром–никель–олово–серебро в диапазоне токов от 3 А до 9 А равняется соответственно 2,7 °С и 2,1 °С. Это связано, прежде всего, с различием в коэффициенте теплопроводности материалов, из которых сформированы слои металлизации, максимальный из которых приходится на структуру хром–никель–олово–серебро, а также значениями теплоемкости, плотности и удельного электрического сопротивления. Последние три показателя в совокупности также являются более предпочтительными с точки зрения обеспечения наименьшего теплового сопротивления между кристаллом полупроводника и выводной рамкой с учетом наличия слоя припоя для слоя металлизации,

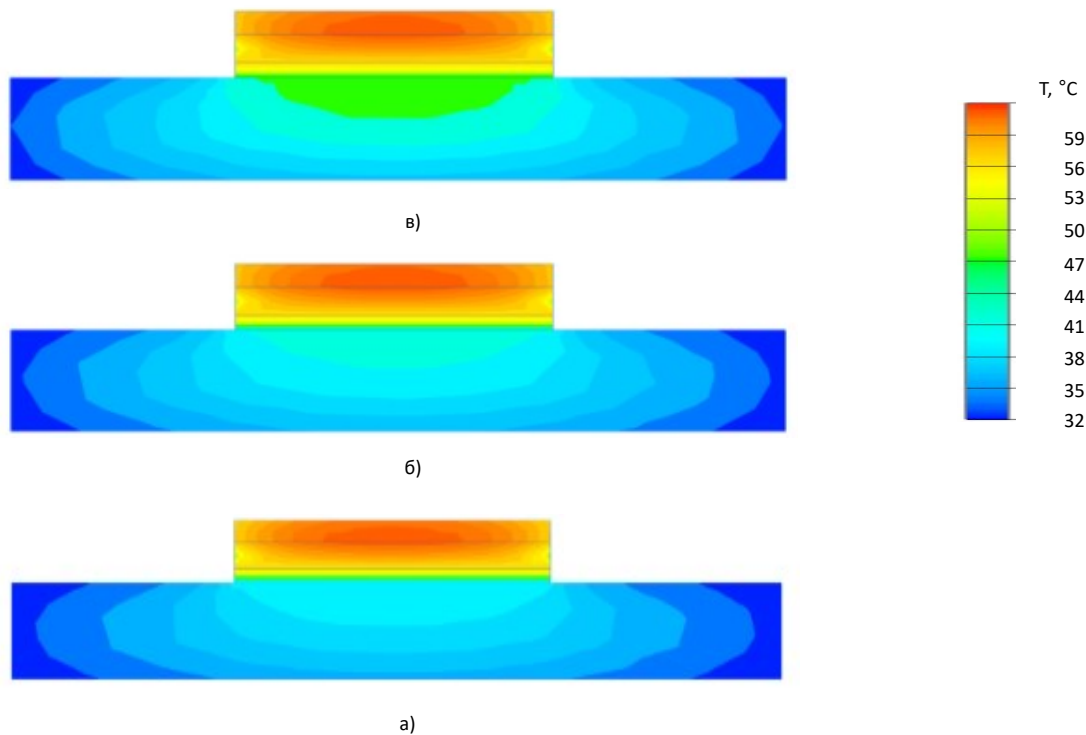


Рис. 4. Двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для различных токов питания при использовании слоя металлизации в виде структуры хром–никель: а — 3 А, б — 6 А, в — 9 А

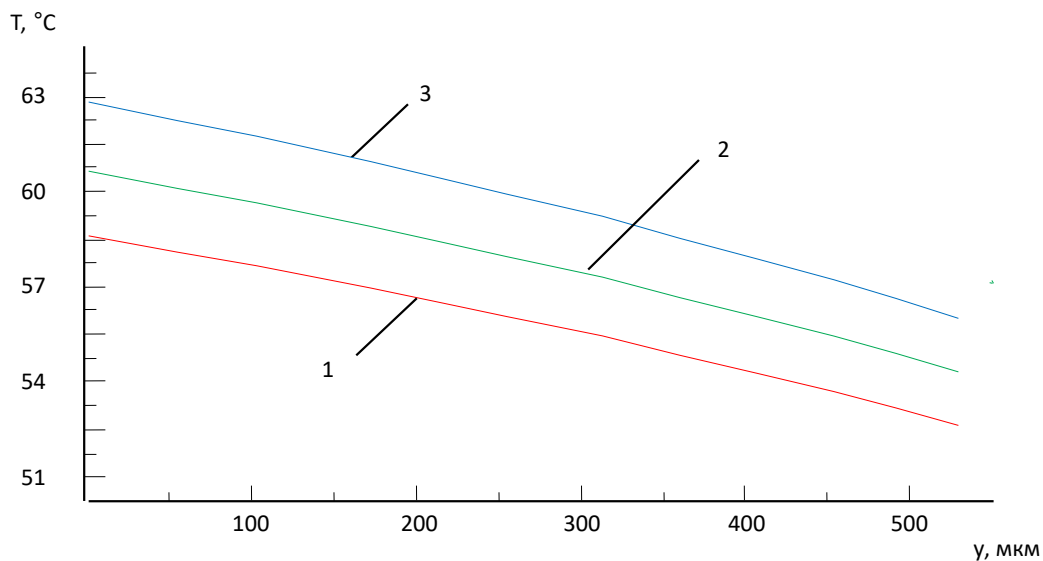


Рис. 5. Изменения температуры по толщине слоя металлизации при использовании структуры хром–никель для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

изготовленного из структуры хром–никель–олово–серебро.

В общем по результатам расчетов тепловое сопротивление мощного биполярного транзистора рассматриваемого типа в диапазоне токов питания от 3 А до 9 А для слоя металлизации, изготовленного из структуры хром–никель–олово–серебро, составило 0,64 °С/Вт, для слоя хром–никель — 0,87 °С/Вт.

Для анализа динамики изменения температуры биполярного мощного транзистора во времени получены графики изменения температуры его различных точек во времени при различных величинах тока питания.

На рисунках 7–8 изображены зависимости изменения температуры в центре полупроводниково-

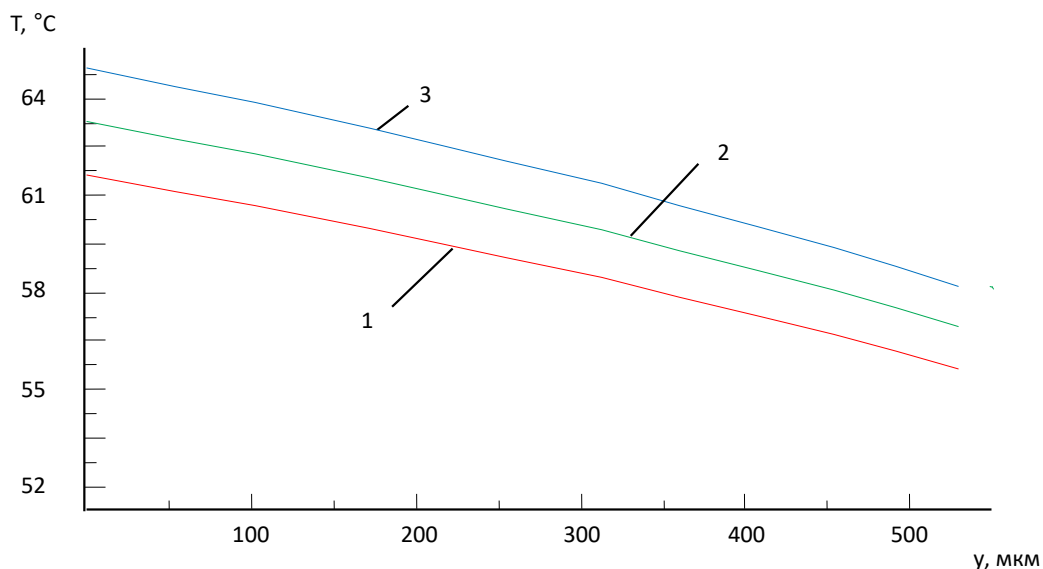


Рис. 6. Изменения температуры по толщине слоя металлизации при использовании структуры хром–никель–олово–серебро для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

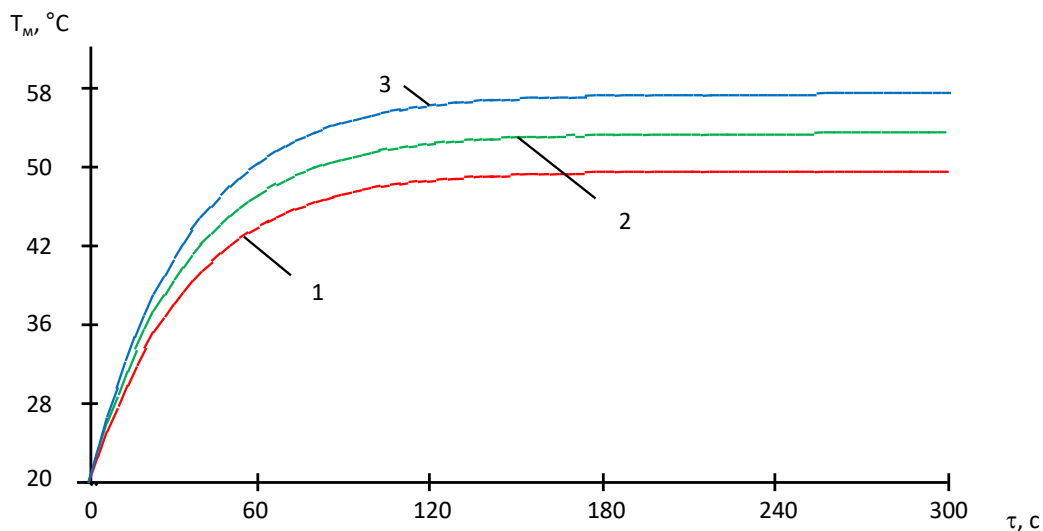


Рис. 7. Изменения температуры в центре области металлизации (Cr-Ni-Sn-Ag) во времени для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

го кристалла со слоем металлизации, выполненным на основе структуры хром–никель–олово–серебро и выводной рамки для токов питания 3 А, 6 А и 9 А.

Заключение

Согласно представленным зависимостям, при выходе температурного режима биполярного транзистора в стационарный режим максимальная температура в области металлизации составляет $57,8 ^\circ\text{C}$, выводной рамки — $39 ^\circ\text{C}$. Продолжительность стабилизации температуры на рассматриваемых областях примерно одинакова и составляет порядка 130 с. При этом увеличение тока питания на 3 А повышает температуру в каждой рассматриваемой области примерно на $3 ^\circ\text{C}$. Данное обстоятельство объясняется относительно близкими теплофизическими параметрами всех областей биполярного транзистора и принятыми при математическом моделировании ограничениями. В результате полученных данных металлизация обратной стороны структуры транзистора слоем хром–никель–олово–серебро показало улучшенные тепловые параметры прибора.

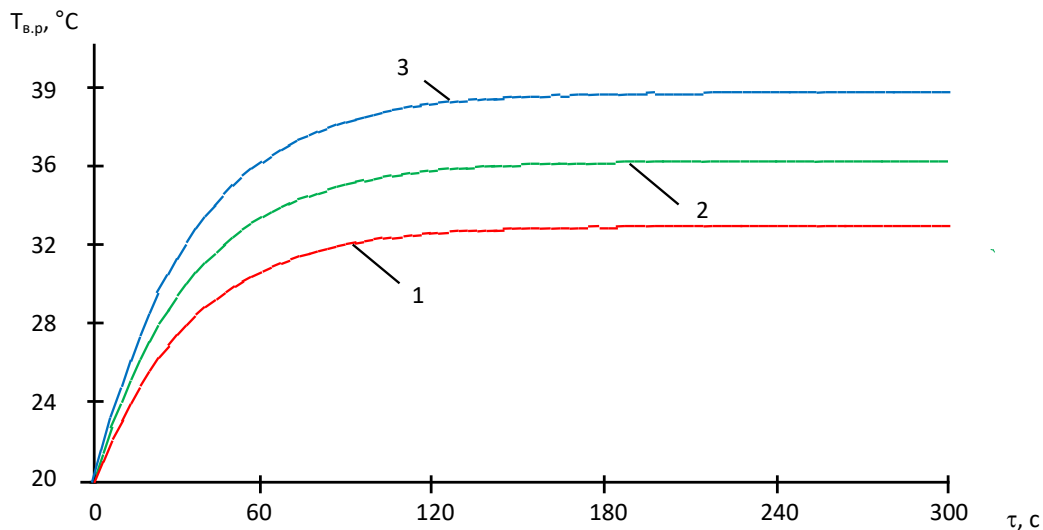


Рис. 8. Изменения температуры в центре выводной рамки во времени для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

ЛИТЕРАТУРА

1. Нечаев А. М., Синкевич В. Ф., Козлов Н. А. Расчет стационарных тепловых полей в структурах мощных транзисторов. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 1989;1:19–24.
2. Шахмаева А. Р., Казалиева Э. Способ присоединения кристаллов транзисторов к основанию выводной рамки в процессе сборки полупроводникового прибора. *Датчики и системы*. 2024;1:32–37. DOI: 10.25728/datsys.2024.1.7.
3. Shakhmayeva A. R., Kazalieva E. Technology of Metallization of the Structure of a Semiconductor Device by a Composition of Nanosized Metal Layers. *Russian Microelectronics*. 2023;52:228–231. DOI: 10.1134/S1063739723600772.
4. Закс Д. И. *Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем*. М.: Радио и связь; 1983. 128 с.
5. Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Никулин С. С. и др. *Решение задач теплопроводности методом конечных элементов*. Томск: Изд-во ТГТУ; 2014. 80 с.
6. Наседкин А. В., Наседкина А. А. *Моделирование связанных задач: математические постановки и конечно-элементные технологии*. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета; 2019. 176 с.
7. Леонтьев А. И. *Теория тепломассообмена*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2018. 464 с.
8. Румянцев А. В. *Метод конечных элементов в задачах теплопроводности*. Калининград: КГУ; 2010. 95 с.
9. Румшиский Л. З. *Математическая обработка результатов эксперимента*. М.: Наука; 1971. 192 с.
10. Шахмаева А. Р., Казалиева Э. Разработка технологии посадки кристалла мощного транзистора на основание корпуса с улучшенными характеристиками. *Наукоемкие технологии*. 2023;24(8):5–11. DOI: 10.18127/j19998465-202308-01.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-06

ПРОБЛЕМА НЕОБРАТИМОСТИ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ И В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ**В. М. Еськов^{1,a}, М. А. Филатов^{2,b}, Т. В. Воронюк^{3,c}, Е. Г. Мельникова^{3,e}, А. Ю. Кухарева^{3,d}**¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
г. Сургут, Российская Федерация² Сургутский филиал Тюменского индустриального университета, г. Сургут, Российская Федерация³ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация^a firing.squad@mail.ru, ^b  filatovmik@yandex.ru, ^c kosolty@list.ru, ^e pion_mma@mail.ru,^d alja.87@mail.ru

Аннотация: в своей последней публикации в «Успехах физических наук» по проблеме квантового сознания М. Б. Менский (2007 г.) объединяет все три «великие» проблемы В. Л. Гинзбурга в одну общую проблему. Это проблема необратимости на молекулярном уровне (в термодинамике). Такая необратимость (движения материи) компенсируется некими усредненными (статистически) величинами. Это температура, давление, энтропия. Однако у биосистем уже нет таких констант. Из-за эффекта Еськова–Зинченко статистическая усредненность не может быть применима. Появляется принципиальная неопределенность, и необходимы новые подходы.

Ключевые слова: статистика, необратимость, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Еськов В. М., Филатов М. А., Воронюк Т. В., Мельникова Е. Г., Кухарева А. Ю. Проблема необратимости в квантовой механике и в живых системах. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):50–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-06.

Поступила в редакцию: 19.08.2024.

В окончательном варианте: 10.09.2024.

THE PROBLEM OF IRREVERSIBILITY IN QUANTUM MECHANICS AND LIVING SYSTEMS**V. M. Eskov^{1,a}, M. A. Filatov^{2,b}, T. V. Voronyuk^{3,c}, E. G. Melnikova^{3,d}, A. Yu. Kukhareva^{3,e}**¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation² Surgut Branch of Tyumen Industrial University, Surgut, Russian Federation³ Surgut State University, Surgut, Russian Federation^a firing.squad@mail.ru, ^b  filatovmik@yandex.ru, ^c kosolty@list.ru, ^d pion_mma@mail.ru,^e alja.87@mail.ru

Abstract: in his publication in Uspekhi Fizicheskikh Nauk on quantum consciousness, M.B. Mensky (2007) integrates all three of V.L. Ginzburg’s “great” problems into a unified framework, focusing on the issue of irreversibility at the molecular level within thermodynamics. This irreversibility, representing the motion of matter, is typically compensated for by statistically averaged values such as temperature, pressure, and entropy. However, in biological systems, these constants do not apply. Due to the Eskov–Zinchenko effect, statistical averaging becomes inapplicable, leading to a state of fundamental uncertainty. Consequently, new approaches are required to address these complexities.

Keywords: statistics, irreversibility, the Eskov–Zinchenko effect.

Cite this article: Eskov V. M., Filatov M. A., Voronyuk T. V., Melnikova E. G., Kukhareva A. Yu. The Problem of Irreversibility in Quantum Mechanics and Living Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):50–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-06.

Original article submitted: 19.08.2024.

Revision submitted: 10.09.2024.

Введение

В 2007 году М. Б. Менский завершил серию своих публикаций о квантовой теории сознания [1]. Он напоминает о трех «великих» проблемах физики, которые сформулировал В. Л. Гинзбург в своей уникальной статье о великих проблемах физики [2]. Менский подчеркивает, что все три эти проблемы сводятся к первой великой проблеме [1].

Однако Менский пытается ответить на второй базовый вопрос: «Что такое жизнь с точки зрения физики?» [1]. Напомним, что попытку ответа на этот вопрос постарался сделать еще Шредингер в середине XX века. Этот вопрос неоднократно поднимали многие выдающиеся ученые XX века. Однако в начале XXI века дискуссия затухает. Причины потери интереса к этому нам пока неизвестны.

После публикации Менского в научной литературе к этому почти не возвращаются. При этом еще в 1948 году W. Weaver предлагал вообще создать новую (третью после детерминистской и стохастической науки (ДСН)) науку для описания биосистем [3]. Очень странно, но физики и математики настойчиво обходят эту проблему [4–8] последние 20 лет.

Представления В. Л. Гинзбурга [2] и М. Б. Менского о живых системах

В своей фундаментальной публикации о проблемах физики В. Л. Гинзбург особым образом выделил три великие проблемы [2]. В ряде публикаций М. Б. Менский пытается вновь поднять эти три великие проблемы с позиций квантовой механики (КМ): интерпретация измерений в КМ [1]. Менский сводит эти проблемы к одной, но это не совсем корректно.

Напомним, что говорил Менский [1]. Он выделил эти проблемы так: «(1) Интерпретация квантовой механики: что происходит при измерении? (2) Феномен жизни и редукционизм: что такое жизнь с точки зрения физики? (3) Стрела времени: откуда берется необратимость?» Отметим, что подобное обсуждал и I. R. Prigogine [9], но он не отказывался от статистики и динамического хаоса (ДХ).

В своей завершающей работе «The End of Certainty» [9] Prigogine поднимал вопрос необратимости проблем редукции живых систем и касался проблемы измерений в квантовой механике. В этой книге (результат 20 лет работы нобелевского лауреата, по его же признанию) Prigogine доказывает бесполезность детерминистского подхода в изучении биосистем [9].

Фактически нобелевский лауреат отрицает возможности теории динамических систем (ТДС) в описании биосистем. Эти биосистемы ранее W. Weaver вынес вообще в отдельный класс — системы третьего типа (СТТ) [3]. Однако работы Weaver, Гинзбурга, Prigogine, Менского никто активно в науке не обсуждает. Почему так случилось? Почему современное научное сообщество столь равнодушно?

На последний вопрос убедительно ответил Гинзбург в самом начале своей замечательной работы [2]. Представим цитату нобелевского лауреата: «Однако лишь победа тоталитаризма... может радикально помешать прогрессу в науке в результате возникновения явлений типа лысенковщины» [2]. Это убеждение Гинзбурга, но и к работе Гинзбурга [2] не отнеслись с должным вниманием.

Фактически нобелевский лауреат выступил против догматизма в науке [2]. В этом случае отсутствует любая возможность релятивизма, т. е. отхода от традиционных представлений, теорий и моделей в науке. Одна из таких догм — это успехи моделей ТДС в науках о жизни. Напомним, что были даже вручены нобелевские премии за целый ряд работ в области биологии и медицины на базе ТДС.

Например, модель Лотка–Вольтерра или уравнения Hill (по мышцам) и т. д. Никто и никогда не сомневался в правильности (корректности) такого описания моделей (ТДС) для биосистем (СТТ — complexity, по Weaver [3]). Это просто догма современной науки: модели ТДС описывают биосистемы (ТДС эффективна). В этом сомневались Гинзбург и Менский. Они прямо указывали на это в своих работах [1,2].

Напомним 2-ю цитату Гинзбурга: «... можно ли считать, что возможность редукции биологии к современной физике несомненна? ... дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильным... мы даже на фундаментальном уровне еще не знаем чего-то необходимого для редукции» [2, с. 436]. Выделим особо понятие «фундаментальный уровень» [2]. Что Гинзбург хотел этим сказать, что такое «фундаментальный»?

Очевидно, что таким фундаментальным уровнем является возможность применения моделей и теорий всей современной ДСН в изучении живых систем (СТТ). Можно ли применять ТДС (точно!) для описания СТТ? Можно ли применять методы и модели стохастики в изучении биосистем? Если нет, то почему это невозможно? Подчеркнем, что до настоящего времени так вопрос никто не ставил. Только Weaver сделал рабочую попытку [3].

Все эти ученые (см. выше) высказывали надежду на новые открытия в отношении биосистем — СТТ. Например, Гинзбург говорил: «Об этом будущем нельзя не думать с завистью — сколь много важного и интересного мы узнаем даже в ближайшие лет десять!» [2]. Насколько был прав нобелевский

лауреат (хоть и не дожил до этого), какова была его интуиция в предчувствии нового. Именно за эти последние 10 лет и был открыт «фундаментальный уровень».

За период 2000–2010 гг. мы открыли эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) в живых биосистемах. Фактически этот ЭЕЗ полностью закрывает дальнейшие возможности использования ТДС и всей стохастики в изучении и описании любых живых систем — СТТ [4–8, 10–14]. Однако остается проблема догматизма. Можно ли избежать догматизма в науке?

Великие догмы в науке

Действительно, существует ряд догм в современной науке, которые создают указанный «тоталитаризм» и лысенковщину. Напомним, что Гинзбург понимал под «лысенковщиной». Это не разные «обычные» идеи, а догма одной идеи в науке. Лысенко клеймил генетику, и это уже догма в науке. Наука должна базироваться на фактах, а не догмах, должна быть возможность релятивизма.

Понимание догмы в науке базируется на отрицании других мнений и других фактов. Именно это и делал Лысенко, когда отрицал генетику как науку. Сейчас во всей науке (ДСН) господствует мнение, что модели в ТДС могут описывать биосистемы. Напомним, что 1-я модель в виде дифференциального уравнения (ДУ) появилось в науке в конце XVIII века.

Это была модель Мальтуса: $dx/dt = ax$, где $x = x(t)$ — численность популяции без лимитирования. Через 30–40 лет появилась модель Ферхюльста–Пирла: $dx/dt = (a - bx)x$, т. е. система с обратной связью ($-bx$). За модели в рамках ТДС несколько ученых получили нобелевские премии (модель Лотка–Вольтерра, модель Hill, Ходжкина–Хаксли и т. д.) Была твердая уверенность, что они количественно что-то описывают.

Все эти модели были на базе ДУ, но главное: в природе нет биосистем, которые бы (точно!) такие модели могли описывать. Модели ТДС имеют качественный характер, они гипотетические (воображаемые). Напомним, что в ТДС все точно описывается, а фазовая траектория точно и многократно может быть повторена. Любое повторение и точный прогноз будущего — основа ТДС. Но биосистемы не описываются точно в ТДС.

Напомним, что у биосистем нет точности. Любая динамика СТТ весьма приближенна, и поэтому последние 150–200 лет биология, медицина, психология и т. д. работают в рамках статистики. Мы должны повторить опыт и получать выборки. Появилась вторая догма: стохастика описывает биосистемы — СТТ. Эта догма работает во всей биомедицине и по настоящее время.

Итак, первая догма ДСН: ТДС может описывать биосистемы. От нее отказался I. R. Prigogine в книге «The End of Certainty...» [9]. Но он надеялся на стохастику и теорию динамического хаоса (ТДХ). Все ученые сейчас используют стохастику в изучении СТТ.

Это было второй догмой, от которой за всю историю человечества отказался только W. Weaver [3]. Никто даже не постарался проверить эту догму: стохастика описывает биосистемы (СТТ). Для этого надо зарегистрировать две соседние выборки $x_i(t)$ на интервалах времени Δt_1 и Δt_2 . Достаточно было проверить статистическую устойчивость любой выборки СТТ [10–14].

Надо было проверить, с какой частотой эти две выборки совпадут (статистически). Мы это сделали более 20 лет назад и убедились, что две соседние треморограммы (ТМГ) совпадают с вероятностью $p_{i,i+1} \leq 0,05$. Две соседние теппиграммы, электромиограммы (ЭМГ), кардиоинтервалы (КИ) совпадут с частотой $p_{i,i+1} \leq 0,2$. Все это было легко проверить, но никто этого не сделал (до нас). Никто даже не делал попытки проверить это!

Все это очень малые величины. Напомним, что в статистике требуется доверительная вероятность $p_i \geq 0,95$. Это означает, что из 100 опытов в 95 мы будем иметь совпадение. Этого нет у всех биосистем. Очень странно, что за последние 200 лет никто даже не пытался это проверить. Это основа ЭЕЗ [11–14], который мы изучаем более 20 лет.

Таким образом, две фундаментальные догмы (ТДС описывает СТТ и стохастика дает прогноз будущего для биосистем) лежат в основе всей современной науки при изучении любых функций организма человека и всех биосистем в целом. Стохастика и ТДС активно используются для прогноза состояния биосистем, и это ошибка всей современной науки в изучении СТТ [10–14].

Почему стохастика создает необратимость СТТ

Совершенно ясно, если нет устойчивости выборок любых параметров, любых функций человека, то стохастика уже не применима для описания СТТ. Очевидно, что если не работает стохастика, то

тем более не работает и вся детерминистская наука (ТДС). Нет статистической устойчивости выборок и тем более нет точного совпадения (точек фазовой траектории при повторях).

Иными словами: разрушение 2-й догмы ДСН (о стохастике) автоматически ведет к отрицанию любых моделей в рамках ТДС. Напомним, что Prigogine выступил [9] против детерминизма, но он поддерживал стохастику и ТДХ Лоренца в отношении всех биосистем — СТТ. Нобелевский лауреат был уверен в ТДС, хотя понимал необратимость всех СТТ. Все это тоже является догмами физики в отношении СТТ.

Сейчас становится очевидно, что ЭЭЗ завершает дальнейшее применения стохастики не только из-за статистической неустойчивости выборок, но и из-за потери однородности любой экспериментальной группы. Для примера мы представляем матрицу парных сравнений 15-ти выборок КИ у одного испытуемого (сидя, в покое). В таблице 1 даны все критерии Вилкоксона p_{ij} для всех пар сравнения.

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок КИ одного и того же человека (в покое), использовался критерий Вилкоксона (критерий различий $p < 0,05$, число совпадений $k = 10$) [4]

	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	

Очевидно, что в таких таблицах мы представляем критерии Вилкоксона p_{ij} , если $p_{ij} \geq 0,05$, то такая пара весов выборок КИ может иметь общую генеральную совокупность. Всего число таких пар k обычно в таблице 1 (и других) невелико. Обычно $k < 20\%$ (для КИ и ЭМГ).

Это доказывает ЭЭЗ для одного испытуемого. Но ЭЭЗ имеет место и для якобы однородных групп. Если взять 15 (якобы одинаковых) людей и у каждого зарегистрировать выборки (КИ, ЭМГ, ТМГ и т. д.), то мы получим типичную таблицу 2. В этой таблице 2 по критерию Манна–Уитни мы имели малое число k_2 пар, для которых $p_{ij} \geq 0,05$. Это тоже парное сравнение, но разных испытуемых.

Это означает, что все эти испытуемые не имеют общих генеральных совокупностей. В этом случае статистика запрещает объединять таких людей в общую группу. Это не однородная группа. С ней нельзя работать в стохастике. Все это запрещает дальнейшее применение стохастики (и ТДС) в изучении биосистем — СТТ. Обе догмы не верны. Необходимо создавать новую (третью после ДСН) науку для описания статистически неустойчивых систем.

Обсуждение

Проблема необратимости является 1-й главной проблемой (из 3-х главных проблем Гинзбурга [3]). Она связана с работами I. R. Prigogine и активно обсуждается во всей современной науке (ДСН). Третьей главной проблемой физики является проблема редукции: можно ли описывать биосистемы в рамках современной науки (ДСН)? Решение этих проблем связано с доказательством ЭЭЗ.

Оказывается, что любая выборка любого параметра функции организма человека не является статистически устойчивой. Любая выборка уникальна, и она не дает прогноз будущего состояния СТТ. Нужна новая, третья наука для биосистем.

Сейчас мы показали, что в науке (ДСН) существуют фундаментальные догмы. Первая из них: модели ТДС могут описывать биосистемы. Более 30 лет назад нобелевский лауреат I. R. Prigogine

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок КИ группы женщин (без нагрузки, число повторов $n = 15$), использовался критерий Манна–Уитни (критерий различий $p < 0,05$, число совпадений $k = 15$)

	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	

показал бессмысленность применения ТДС для описания СТТ. Но эта догма продолжает жить.

По ТДС (для СТТ) было получено несколько нобелевских премий. Сам Prigogine верил в возможности стохастики для описания биосистем. Это было 2-й догмой современной науки. Мы доказали ЭЕЗ, т. е. уникальность любой выборки.

Очевидно, что стохастика не может описывать уникальные (статистически неповторимые) биосистемы. Обе догмы рушатся, и об этом говорил еще W. Weaver в 1948 году. Однако более 50 лет работу Weaver игнорировали. Мы доказали его правоту в виде реальности ЭЕЗ.

Возникает «тоталитаризм» в современной науке, о котором говорил В. Л. Гинзбург еще 25 лет назад. Если нет редукции СТТ, то нет и обратимости, т. к. начальные параметры любой СТТ не могут быть повторимы. Потеря стохастичности в поведении СТТ доказывает их необратимость. В итоге СТТ не описывает ДСН.

Таким образом, мы приходим к необходимости в отказе от двух фундаментальных догм ДСН. Оказывается, что ТДС и стохастика не могут описывать СТТ. Нужна новая наука для изучения биосистем. Сейчас мы такую науку создаем — это теория хаоса–самоорганизации [10–14].

Выводы

В. Л. Гинзбург предупреждал о невозможности догм (тоталитаризма) в науке [2]. Одновременно Гинзбург говорил о редукции и о необратимости в физике и в живых системах. В любом случае необратимость будет везде, если мы не можем повторить начальное состояние $x(t_0)$ любого параметра $x_i(t)$ объекта. Тогда редукция СТТ невозможна в применении их не только в рамках ТДС, но и в стохастике.

Сегодня мы живем в рамках двух базовых догм: модель ТДС описывает биосистемы (СТТ) и стохастика может описывать будущее (давать прогноз) любой биосистемы. Это фундаментальные догмы, против которых выступили W. Weaver и I. R. Prigogine. Их ошибочность доказывает наш ЭЕЗ.

Оказалась, что любая выборка любого параметра организма человека $x_i(t)$ уникальна, а любая (якобы однородная) группа испытуемых будет неоднородной. После доказательства ЭЕЗ эти догмы завершились. Мы живем в мире неустойчивых биологических систем (по статистике). Это требует создания новой науки для описания живых систем. Гинзбург был прав, за первые 10 лет мы доказали фундаментальное свойство СТТ (в виде ЭЕЗ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Менский М. Б. Квантовые измерения, феномен жизни и стрела времени: связи между «тремя великими проблемами» (по терминологии Гинзбурга). *Успехи физических наук*. 2007;177(4):416–425. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200704j.0415.

2. 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.
3. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
4. Газя Г. В., Еськов В. В., Чемпалова Л. С., Башкатова Ю. В., Гриценко И. А. Существует ли хаос в генерации кардиоритма? *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;1:17–27. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-17-27.
5. Зимин М. И., Пятин В. Ф., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Что общего между «Fuzziness» L. A. Zadeh и «Complexity» W. Weaver в кибернетике. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):102–112. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-11.
6. Eskov V. V., Gazya G. V., Bashkatova Yu. V., Filatova O. E. Systems Synthesis: Environmental Factors Impact Assessment in non Indigenous Women Living in the North. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022;981(3):032089. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032089.
7. Orlov E. V., Filatova O. E., Galkin V. A., Chempalova L. S. The Prospects of New Invariants Creating in Biocybernetics. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2700:040056. DOI: 10.1063/5.0138430.
8. Хадарцева К. А., Филатова О. Е. Новое понимание стационарных режимов биологических систем. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):92–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-10.
9. Prigogine I. R. *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. New York, London, Toronto, Sidney, Singapore: Free Press; 1996. 235 p.
10. Eskov V. V. Modeling of Biosystems from the Stand Point of «Complexity» by W. Weaver and «Fuzziness» by L. A. Zadeh. *Journal of Physics Conference Series*. 2021;1889(5):052020. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052020.
11. Еськов В. В., Шакирова Л. С. Почему детерминистский и стохастический подход невозможно использовать в кардиологии и во всей медицине? *Вестник новых медицинских технологий*. 2022;29(4):117–120. DOI: 10.24412/1609-2163-2022-4-117-120.
12. Еськов В. В., Газя П. Е., Коннов П. Е. Фундаментальные проблемы биокибернетики из-за неустойчивости выборок биосистем. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):110–122. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-13.
13. Пятин В. Ф., Еськов В. В. Может ли быть статичным гомеостаз? *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):41–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-3.
14. Козупица Г. С., Пятин В. Ф., Кухарева А., Байтуев И. А. Три великие проблемы Гинзбурга и три реальные проблемы биомедицины. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;3:5–14. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-3-5-14.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-07

ФРАКТАЛЬНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПРОЦЕССУАЛЬНОСТЬ В РАЗВИТИИ ПРИРОДЫ СОЗНАНИЯ**Б. А. Богатых***г. Обнинск, Российская федерация, ✉ bogboris@yandex.ru*

Аннотация: рассмотрены ключевые вопросы фрактально-голографического конструкта (ФГК) в различных его проявлениях — кластеризации, аттракторно-репеллерной природы — головного мозга, развития природы психического и природы сознания в процессе эмансипации ребенка. Рассмотрен спектр поэтапно и постепенно развивающихся и формирующихся механизмов саморегуляции личности, осуществляющихся при задействовании уже на самых ранних этапах развития ребенка как гомеостатических ФГК-аттракторов, так и фрактально-кластерной архитектуры, а точнее — фрактально-голографической кластеризации. Выдвинуто предположение, что фрактально-голографическая кластеризация используется в обоих направлениях — когда данная точка распадается на ту или иную совокупность точек, т. е. некий кластер, так и при обратном процессе, т. е. при ассиметричном ответе. Данная процессуальность объясняется преимущественно в рамках природы аттрактора Плыкина, способствуя как развитию ребенка, так и формированию его сознания и творческих способностей.

Ключевые слова: фрактально-голографический конструкт, фрактально-голографическая кластеризация, странные аттракторы — множество Кантора, аттрактор Плыкина, эмансипация ребенка, функционирование у ребенка бессознательного и сознания.

Для цитирования: Богатых Б. А. Фрактально-голографическая процессуальность в развитии природы сознания. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):56–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-07.

*Поступила в редакцию: 22.05.2024.**В окончательном варианте: 15.08.2024.***FRACTAL-HOLOGRAPHIC PROCEDURALITY AND THE NATURE OF CONSCIOUSNESS****B. A. Bogatykh***Russia, Obninsk, Kaluga region, ✉ bogboris@yandex.ru*

Abstract: this study explores the key aspects of the fractal-holographic construct (FHC) in its various manifestations, including clustering, the attractor-repeller nature of the brain, and the development of mental processes and consciousness during child emancipation. The gradual emergence and development of personality self-regulation mechanisms are examined, occurring through the use of both homeostatic FHC attractors and a fractal-cluster architecture, particularly through fractal-holographic clustering, even at the earliest stages of a child's development. It is proposed that fractal-holographic clustering functions bidirectionally – where a single point divides into a set of points, forming a cluster, and through a reverse process, in which a set of points forms an asymmetric response. This dynamic is primarily explained within the framework of the Plykin attractor, which plays a role in both the child's development and the growth of their consciousness and creative abilities.

Keywords: fractal-holographic construct, fractal-holographic clustering, strange attractors, Cantor set, Plykin attractor, child emancipation. The functioning of the child's unconscious and consciousness.

Cite this article: Bogatykh B. A. Fractal-Holographic Procedurality and the Nature of Consciousness. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):56–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-07.

*Original article submitted: 22.05.2024.**Revision submitted: 15.08.2024.*

*Человек — это вселенная, которая
с ним рождается и с ним умирает.*

Генрих Гейне

Введение

Организация и функционирование сложных природных систем — эмбриональное развитие, нервные сети головного мозга, природа сознания, экологические и социальные сети и т. д. — требуют, на наш взгляд, наиболее адекватного поиска природы исследования данных явлений. Этому,

по-видимому, будет отвечать природа фрактально-голографического конструкта в различных его проявлениях: кластеризации, аттракторно-репеллерной природы.

Поиск подходов к развитию представлений (концепции) аттракторно-репеллерной природы, как и фрактально-голографической кластеризации (ФГКл), в процессуальности развития природы психического и сознания, нами осуществляется в рамках «парадигмы числового поля» (ПЧП). В контексте данной парадигмы будет отвечать привлечение наиболее адекватного как физического, так и математического инструментария природы гомеостатического фрактально-голографического конструкта (ФГК) странных аттракторов, в частности, аттрактора множество Кантора (канторова пыль) [1] и аттрактора Плыкина.

Основы ФГК

ФГК состоит из двух основных элементов: фрактальности и голографии. Фрактал имеет весьма необычную природу восприятия, так как обладает дробной размерностью. В связи с этим в трехмерном пространстве фрактал отобразить довольно сложно, ибо в привычных целых размерностях его совершенно нельзя описать. К фракталу, например, невозможно провести касательную линию, так как его структура бесконечно дробится.

Выявление природы странных (фрактальных) аттракторов явилось результатом исследовательской программы специализации методов топологической динамики в области дифференциальной топологии. Цель данной программы, осуществление которой происходило во второй половине XX века, состояла в динамическом и структурном изучении предельных инвариантных множеств типа «подковы», которые получили название базисных. В совокупности базисных множеств как раз и был найден частичный порядок. Экстремальные по отношению к этому порядку множества либо притягивают к себе траектории точек достаточно малых своих окрестностей, формируя странные аттракторы, либо выталкивают за пределы достаточно малых окрестностей все точки, не принадлежащие этому множеству — формирование репеллеров [2, 3, 4]. Причем репеллеры в своей природе отчасти повторяют те же предельные инвариантные множества типа «подковы Смейла». Следует при этом отметить, что в своей первой работе Р. В. Плыкин тогда еще не общепринятые термины «аттракторы» и «репеллеры» называет просто «стоки» и «источники» [4].

Для дальнейшего анализа нам необходимо в краткой форме ознакомиться с природой ФГК, а также с некоторым математическим аппаратом, присутствующим в природе как живого, так и неживого. Более детально все они представлены в предыдущих наших работах [5, 6]. Наряду с этим, в ряде предыдущих наших работ рассмотрена природа странного аттрактора [5, 7], а также математический аппарат фрактальной геометрии в мире живого и неживого: ряды Фибоначчи, золотая пропорция, немарковские процессы, а также разного вида математические прогрессии [5, 6, 7].

Здесь применяется процесс рекурсии (от лат. *recurentis* — возвращающийся), которая в математике понимается как способ определения функций, где значения в каждой точке определяются через значения в предыдущих точках. Классическим примером рекурсии является последовательность чисел Фибоначчи (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13 ...), в которой, начиная с третьего, каждый следующий член составляет сумму двух предыдущих.

Важно отметить, что особенность синтеза этих двух уникальных концептуальных конструктов — голографии и фрактальности — является чрезвычайно полезным для понимания принципа работы сознания, целостной связи человека не только с живой природой, но и со всей Вселенной, на что указывал Дэвид Бом [8]. По мысли Бома, информация о Вселенной, опосредуемая мозгом человека через нейронную организацию, становится доступной каждой клетке (не только мозга) человека, т. е. аналогично генетической информации, содержащейся в генах каждой отдельной клетки тела организма [8]. Исходя из этого, структура данной организации — ФГК, — на наш взгляд, становится более упорядоченной при нарастании большого количества степеней свободы, проявляя при этом ряд особенностей, которые обозначены в нашей предыдущей работе [6].

Кроме того, базируясь на вышеизложенном, нам необходимо кратко рассмотреть также различные уровни реальности, предложенные Дэвидом Бомом, который, опираясь на природу голографии, выдвинул идею, что реальность, которую повседневно осязает человек, — это всего лишь иллюзия. По мысли Бома, на более глубоком порядке бытия находится беспредельный и изначальный уровень реальности — **имплицативный**, т. е. «скрытый» порядок реальности, который существует за пределами пространства и времени. Та же реальность, которую повседневно осязает человек, — **эксплицативный**

уровень, или реальность раскрытого порядка. Бом утверждает, что вся Вселенная — это одна большая голограмма и все во Вселенной — часть континуума [9]. В рамках же фрактально-волновой природы вся Вселенная имеет большую фрактально-голографическую природу, находясь при этом как на имплективном уровне реальности (ИУР), так и на эксплективном (ЭУР). Иными словами, как ИУР, так и ЭУР, играя роль в создании реальности, также обладают, каждый по-своему, природой ПЧП, которую рассмотрим чуть ниже.

Известно, что для живых систем понятие «адаптивное поведение» подразумевает рефлексии динамики параметров внешней среды и ответное изменение внутреннего состояния живых систем с условием сохранения оптимально возможных в данных условиях рамок жизнедеятельности. Данное явление получило название «гомеостазис», т. е., *гомеостатика* [10], оно характерно для различных уровней иерархии живого — как для отдельной растительной или животной клетки, так и для человека, группы людей, животных и т. д. Характерной особенностью гомеостатики явилось изучение и построение моделей, основанных на управлении противоположностями, что стало важным ресурсом любой подсистемы живого организма, как и мира неживого, с точки зрения его гармонизации. По сути, гомеостатическая система состоит из элементарных ячеек управления — своеобразных гомеостатов, имеющих одну и ту же структурную универсальную схему. Причем объединяющим принципом данных ячеек управления (гомеостатов), формирующих иерархическую структуру, на наш взгляд, будет являться фрактальность, а точнее — ФГК.

Иными словами, в основе иерархических структур и живого, и неживого вещества лежит формирование гомеостатических ФГК, весьма динамичных и диалектичных. Структуре-аттрактору гомеостатического ФГК, в данном случае, на наш взгляд, будет отвечать аттрактор — множество Кантора (канторова пыль) (рис. 1).

Как и другие аттракторы, множество Кантора весьма хаотично и имеет геометрическую структуру, к которой стремятся траектории, все более плотно накручиваясь и не пересекая друг друга. Они иллюстрируют определение так называемой фрактальной размерности, которая не равна нулю. Важно отметить, что смысл понятия «размерность» странных аттракторов значительно шире размерности топологической, которая всегда является целочисленной, согласно евклидовой геометрии. Иными словами, фрактальная размерность отражает более «тонкие» топологические свойства объектов, т. е. дробную размерность, или размерность подобия [11].

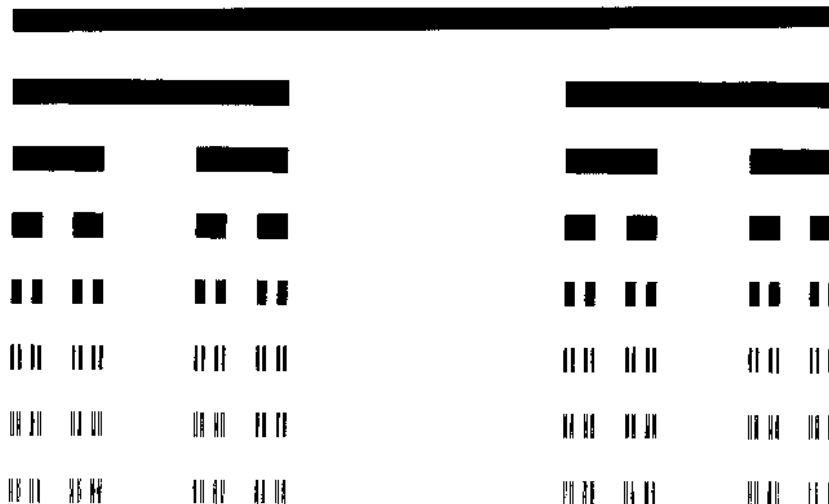


Рис. 1. Множество Кантора (канторова пыль) (по [12])

Здесь фактически срабатывает феномен, который указывает, что в хаотической работе гомеостатический ФГК будет представлять собой отражение «полиморфического множества симметрий в динамике» [5, с. 94–97]. По сути данный динамический процесс проявляет себя в рамках гомеостатического ФГК и в аттракторах и репеллерах, где каждый из них содержит в себе плодотворный хаос. Результатом этой работы является процесс самоорганизации, эмерджентности, формирования уникальной согласованности и констелляции неслучайных генераций последовательностей линий гомеостатических ФГК-аттракторов, в частности, множество Кантора.

Таким образом, синтез этих двух уникальных концептуальных конструкторов — фрактальности и голографии — является весьма полезным для понимания принципа работы сознания, той целостной связи человека не только с живой природой, но и со всей Вселенной. Например, ряд таких феноменов, как дистрибутивность памяти, способность сенсорных систем к воображению и т. д., подсказывает, что в определенных (измененных) состояниях сознания у человека появляется доступ к информации практически о любом аспекте Вселенной.

При этом совместную работу — любых странных аттракторов и репеллеров — необходимо рассматривать в рамках ПЧП. Здесь важно отметить, что ПЧП странного аттрактора, являясь областью содержания коллективного и индивидуального бессознательного, будет иметь преимущественно нелокальный (квантовоподобный) характер. Репеллеры же — это в основном область сознания, и они преимущественно имеют локальный характер, т. е. ответственны за формирование причинно-следственных связей.

Рассматривая мозг человека в рамках природы гомеостатического ФГК, констатируем, что мозг математически формирует объективную (иллюзорную) реальность из разных более глубоких имплицативных уровней реальности. На наш взгляд, данное начало осуществляется со сплошной (верхней) линии Канторова множества (рис. 1), причем этот нелокальный процесс происходит на основе квантовоподобного взаимодействия тех или иных процессов. По мнению Р. Пенроуза [13], мозг умеет осуществлять переход от «квантово-механического состояния» — алгоритмически неразрешимого и нелокального — к «классическому» через некую редукционную функцию, осуществляя при этом функцию локализации мышления в мысли.

Дальнейшая работа мозга постепенно преобразуется в ЭУР — дробные нижние черточки (рис. 1), где проявляет себя работа репеллеров, но уже с привлечением обычной логики, причинно-следственных связей.

Фрактально-голографическая кластеризация

Одна из особенностей природы фрактала заключается в том, что фрактал, рассматриваемый, так сказать, в поперечном разрезе, представляет собой структуру в виде некой точки. При более близком рассмотрении данная точка распадается на ту или иную совокупность точек, т. е. некий кластер, каждая точка которого вновь распадается на кластер и т. д., до бесконечности.

Данное образование получило название фрактально-кластерной архитектуры (ФКА). Именно в этом состоит одно из проявлений самоподобия фрактала, его геометрии, отражающей при этом тот или иной уровень размерности. Учитывая принцип обратной связи, можно говорить о том, что имеется конвергенция многих нервных путей к одному нейрону, т. е. когда совокупность точек (кластер) сходится в одну точку.

Иными словами, с образованием ФКА, с наличием принципа обратной связи, формируется сложный паттерн тех или иных сетей, способных к самоорганизации, проявляющих себя в организации сложных природных систем: эмбриональное развитие, нервные сети головного мозга, экологические и социальные сети и т. д. Более того, данная ФКА наиболее динамична и диалектична при рассмотрении ее в совокупности с голограммой, т. е. в рамках природы гомеостатической ФГКл [6].

ФКА, а точнее — ФГКл, имеет ассиметричный ответ, а именно, случай, когда совокупность точек формирует обратный процесс. Здесь происходит та ситуация, когда количество точек достигает того числа, которое обеспечивает их взаимодействие с формированием целостности, образуя своеобразный кластер, который превращается в отдельную точку (целостность) с дальнейшей тенденцией по взаимодействию с отдельными точками при формировании уже нового кластера и т. д.

Важно отметить, что вся совокупность органов, составляющих тело, их жизнь отражает собой целокупно жизнь тела как целого. Так, в рамках ФГКл, при рассмотрении эмбрионального развития, это четко видно: вся последовательность развития отдельных органов, имеющих при этом собственную самостийность, т. е. свои четкие возможности и задачи, распадается на ту или иную совокупность точек, т. е. некий кластер актуализации целого оплодотворенной яйцеклетки [14].

Наряду с этим, учитывая также принцип самоафинности, конгруэнтности и другие принципы фрактала, рассмотренные выше, данный фрактально-кластерный подход (ФГКл) с успехом позволяет, на наш взгляд, объяснить ряд трудно разрешимых проблем системной психофизиологии и природы психического [5, 7].

Аттракторно-репеллерная процессуальность в развитии природы сознания

Опираясь на вышеизложенное, необходимо кратко рассмотреть природу человека. Мы понимаем, что человек — весьма вариативная структура, при этом с позиции не только каждого человека, нормального его распределения индивидуальных характеристик, но также и более сложных механизмов проявления личностного развития в мире. Данную особенность — личностное развитие, трансцендентно затрагивающее и биологические, и социальные связи, — осуществил Э. Фромм, однако собственно личностное, по Фромму, у человека равноудалено как от биологического, так и от социального [15]. Естественно, автономная личность сформировалась в процессе исторического развития общечеловеческого опыта, его общения, языка, культуры и многих других составляющих социальных форм проявления.

В этом плане ребенок в младенчестве, естественно, не является личностью, т. к. в этот период он находится только в психологическом симбиозе с матерью. Однако в процессе развития ребенка у него осуществляется ряд эмансипаций, т. е. постепенное выделение ребенка из симбиоза с матерью. При этом процесс ряда эмансипаций осуществляется сначала на биологическом уровне — в виде телесности с матерью, где наличествует общий обмен веществ матери и ребенка, т. е. до перерезания пуповины. После перерезания пуповины осуществляется формирование ребенка как отдельного телесно автономного существа, но при этом с еще весьма неразвитой моторикой.

В итоге разнообразие направлений развития моторики ребенка способствует постепенному развитию его когнитивной эмансипации, которая идет постепенно, поэтапно, при сохранении уже в подрастковом периоде всех тех разнообразных ценностей, самосознания и воззрений, сформированных в его семье. К завершению подросткового периода ребенка — к его 18–20-летнему возрасту — формируется личностная автономная система ценностей, смыслов и особенно мировоззрения.

В конечном итоге на основе ряда эмансипаций, осуществленных преимущественно на биологическом уровне, со временем осуществляется личностная эмансипация уже на социальном уровне [16]. К этому времени развиваются и формируются механизмы саморегуляции личности, которые обеспечивают ей широкую адаптацию к социальным нормам и смыслам социума определенной эпохи, в которой он живет.

В рамках затронутых выше эмансипаций можно отметить аспекты, которые касаются психики, психических процессов, характеризующих организм и поведенческий акт как целое, а также нейрофизиологические процессы, протекающие на уровне отдельных элементов, которые сопоставимы только через информационные системные процессы. Другими словами, осуществляется процесс организации элементарных механизмов в функциональную систему. Как следствие, психические явления могут быть сопоставимы только с процессами организации физиологических процессов, а не с самими локализуемыми элементарными физиологическими явлениями.

В рамках вышеизложенной концепции, структура психики представляет собой систему взаимосвязанных функциональных систем и субъективное отражение объективного соотношения организма со средой. Иными словами, психика, природа психических проявлений формируются в процессе индивидуального развития вместе с функциональными системами, соотносящими организм со средой.

Все это предопределило развитие целостного, системного подхода к взаимоотношенности телесного и психического, широко развитого П. К. Анохиным [17] и его школой. Приложение системного подхода к развитию функциональных систем осуществлялось не только на организменном, но и на клеточном уровне, способствовало, по мнению Ю. И. Александрова [18, с. 353], становлению и развитию системной психофизиологии.

Открытие системных процессов, ответственных за организацию частных физиологических процессов и при этом несводимых к ним, т. е. к тем или иным физиологическим процессам, привело к разработке представлений о качественной специфичности процессов интеграции. В конечном итоге оно явилось открытием нового вида процессов в организме, а именно, системных процессов в целостном организме. Дальнейшие исследования поведения, а также обучения животных показали, что на уровне нейронной активности осуществляется уникальная особенность, а именно, вовлечение нейронов разных областей мозга в системные процессы происходит синхронно [19, 20].

В определенной мере это согласуется с гипотезой А. В. Брушлинского [21] о том, что психика индивида зарождается еще во внутриутробном (пренатальном) периоде. При этом надо полагать, что как появление психического вместе с функциональными системами еще в пренатальном перио-

де, так и его дальнейшее развитие осуществляются при использовании фрактальности, а точнее, во фрактально-голографическом единстве, во всем его разнообразии. Далее, на последнем этапе обмена веществ, энергии и информации происходит формирование высших психических функций и природы сознания. В историческом аспекте это четко увязывается с проблемой соотношения материального и духовного, с разрешением давнего вопроса, сформулированного сначала в виде психофизического, а затем и психофизиологического параллелизма.

Последующая эмансипация — развитие моторики ребенка — обуславливает широкую его подвижность — ползание, хождение, бегание и т. д., вызывая при этом постепенное сокращение психологического симбиоза с матерью [22]. Все это подготавливает ребенка к развитию собственной картины мира, которая в основном начинает формироваться к трем годам жизни. В психологии даже существует такая метафора, что «к трем годам не ребенок, а семья начинает учиться говорить, так как ребенок начинает понимать, что говорят родители, а родители начинают понимать, что говорит ребенок».

Само же возникновение у ребенка собственно сознания увязывается с возникновением и функционированием у него элементарной системы ряда значений, таких как: конструкт, понятие, категориальная структура и т. д. По существу, именно элементарная система значений выступает системообразующим фактором в процессах восприятия, мышления, памяти, внимания и т. д. Наряду с этим у ребенка с детских лет и до взрослости само восприятие, как и память, мышление, воображение, насыщены и одновременно ограничены системой значений в зависимости от той или иной общности или культуры. Иными словами, изменение системы значений будет вести к изменению всего системного строения сознания.

Учитывая вышеизложенное, и в частности, гомеостатический ФГК-аттрактор, в частности, множество Кантора (рис. 1), нам необходимо рассмотреть его участие в процессуальности появления у ребенка психического вместе с теми или иными функциональными системами, вплоть до зарождения сознания.

В дополнение к этому нам необходимо рассмотреть существование смыслового поля, введенное К. Г. Юнгом [23]. Существовая вне времени и пространства, смысловое поле связано с материальным полем через принцип синхронистичности и через психику. Касаясь природы синхронизма, Юнг отмечал, что это не простые случайные совпадения, а процессы, тесно связанные с психикой. Юнг, анализируя широкий спектр психического человека, уделял большое внимание именно числу: «... с абсолютной уверенностью можно сделать вывод, что бессознательное использует число в качестве упорядочивающего фактора» [23, с. 233]. Данный феномен нарушения принципа причинности Юнг назвал принципом *акаузальности* [23]. По существу, здесь причинно-следственная связь исключена, указывая на нелокальность данных эффектов, осуществляемых, по-видимому, квантовоподобными взаимодействиями.

Касаясь физики микромира, следует отметить, что, как отмечал Пол Девис, нелокальные квантовые эффекты фактически являются формой синхронизма. Он оценивал это в том смысле, что квантовые эффекты устанавливают связь, а точнее, корреляцию между событиями, в отношении которых любая причинно-следственная связь исключена [24].

Что касается психологии, то с этой функцией, т. е. с функцией синхронизма, по-видимому, справляется странный аттрактор, перекодирующий, как отмечено выше, смысловую информацию из ИУР в ЭУР — работа репеллеров. Вполне вероятно, что мозг человека, в рамках природы гомеостатического ФГК, математически формирует объективную (иллюзорную) реальность из разных более глубоких имплицативных уровней реальности. Начало данного процесса, как отмечено выше, осуществляется со сплошной (верхней) линии Канторова множества, постепенно преобразуясь в ЭУР — дробные нижние черточки, где проявляет себя работа репеллеров (рис. 1). Здесь ПЧП в ИУР имеет нелокальную реальность, а на ЭУР, т. е. на уровне репеллеров, ПЧП имеет локальную реальность. Данная локальная реальность, как отмечено выше [5], осуществляется в объектах природы как живого, так и неживого теми или иными математическими соотношениями. В виду кажущейся разделенности предметов (разнообразие природы живого — растительных и животных организмов, и также мира неживого), тем не менее, в конечном итоге указывает на слияние ИУР с ЭУР. В рамках данной ПЧП, будет осуществляться диалектический синтез внешнего (среда, различные формы социума и т. д.) и внутреннего (вся совокупность тех или иных осцилляций — генетических, физиологических, функциональных, психических), ведущий к формированию психологического поля.

Учитывая вышеизложенное относительно возможной процессуальности фрактально-голографической природы аттракторно-репеллерной составляющей множества Кантора в развитии сознания, а также ФГКл, необходимо концептуально выявить этапность развития у ребенка природы психического, вплоть до сознания.

Как отмечено выше, психика индивида, зарождаясь еще во внутриутробном (пренатальном) периоде вместе с функциональными системами, и ее (психики), дальнейшее развитие осуществляются при использовании фрактально-голографического, аттракторно-репеллерного единства во всем их разнообразии, но с явным преимуществом функционирования нелокальных квантовых эффектов. В конечном итоге здесь, с учетом природы гомеостатической ФГКл, осуществляется квантовоподобное взаимодействие тех или иных осцилляций — генетических, физиологических, функциональных, психических. Иными словами, формирование функциональных систем, связанных с процессами организации физиологических процессов, как и появление психического, будет осуществляться на основе взаимодействия информационных системных процессов еще в пренатальном периоде, и при дальнейшем развитии психического у индивида в постнатальном периоде, вплоть до формирования высших психических функций и природы сознания.

В качестве данной процессуальности (инструментария) будет, на наш взгляд, выступать гомеостатический ФГК-аттрактор Плыкина (рис. 2) [25], отражающий собой фрактальность каналов [5]. На рисунке в качестве простейшего примера представлена область притяжения из 4-х компонент связностей (трех связностей от трех притягивающихся множеств, а 4-ой связностью является среда). Видно, что притягивающиеся множества порождены отображением верхней фигуры (а) на фигуру внизу (б), в соответствии с рисунком 2. В качестве примера представленных трех связностей от трех притягивающихся множеств может выступать переплетение легочной, нервной и кровеносной систем.

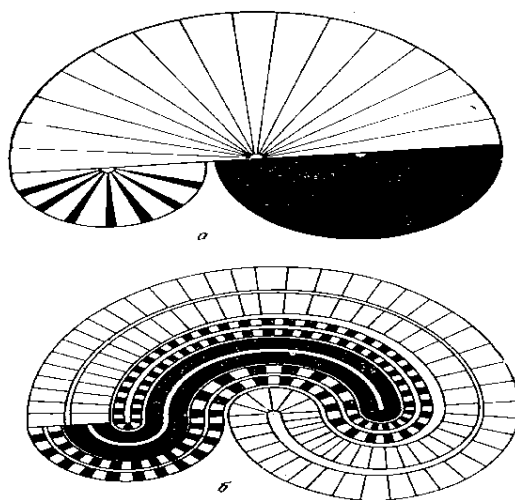


Рис. 2. Аттрактор Плыкина, область притяжения которого состоит из 4-х компонент связности. Притягивающее множество, порожденное отображением фигуры сверху (а) на фигуру внизу (б) по [25]

Следует добавить, что аттрактор Плыкина, область притяжения которого состоит из четырех компонент связности, не является окончательным. Их может быть значительно больше, отражая этим более широкий спектр связанных между собой взаимодействий информационных системных процессов, обеспечивая процесс интеграции физиологических, нейрофизиологических, психических и социальных процессов.

Использование аттрактора Плыкина позволяет, на наш взгляд, отразить взаимодействие широкого спектра информационных системных процессов, через которые фактически сопоставимы, как психические процессы, отражающие целостный организм и его поведенческие акты, как целое, так и нейрофизиологические процессы, осуществляемые на уровне отдельных элементов. Здесь также будет отражаться формирование «общеорганизменных» целостных функциональных систем, которые осуществляются целостно и сразу уже на самых ранних этапах эмбрионального развития организма.

В аттракторах Плыкина (рис. 2), независимо от количества областей притяжения, обязательно одной из связностей является среда. В общей психологии, начиная с работ П. Я. Гальперина, результат

психических процессов, например, восприятия, мышления, памяти, осмыслен как итог преобразования (переноса) внешнего действия в план внутреннего. Иными словами, структура психики, природа психических проявлений, формируясь в индивидуальном развитии, представляют собой систему взаимосвязанных функциональных систем, являясь при этом субъективным отражением объективного соотношения организма со средой. Более того, умственные действия, опираясь на природу психического, представляя собой результат преобразования внешних материальных действий во внутренние, осуществляют преобразования непосредственного восприятия в восприятие опосредованное, через природу психического, с учетом построения когнитивных картин мира. Данная процессуальность включает в процессе развития организма (онтогенеза) все новые связности притягивающихся множеств тех или иных физиологических, нейрофизиологических и психических процессов, вплоть до природы сознания, используя ПЧП.

Заключение

Как отмечено выше, процесс ряда эмансипаций ребенка осуществляется сначала на биологическом уровне — в виде телесности с матерью, где наличествует общий обмен веществ матери и ребенка, т. е. до перерезания пуповины, после ее перерезания происходит формирование ребенка как отдельного телесно автономного существа с еще весьма неразвитой моторикой.

Однако со временем после ряда эмансипаций весь спектр развивающихся и формирующихся, поэтапно и постепенно, механизмов саморегуляции личности осуществляется при задействовании уже на самых ранних этапах развития ребенка как гомеостатических ФГК-аттракторов, так и ФКА, а точнее — ФГКл. ФГКл используется в обоих направлениях: когда данная точка распадается на ту или иную совокупность точек, т. е. некий кластер, так и обратный процесс — т. е. асимметричный ответ.

Данная ФГКл, используемая в обоих направлениях, на наш взгляд, начиная еще с внутриутробного (пренатального) периода развития как природы телесного, так и природы психического ребенка, будет иметь преимущественно нелокальный (квантовоподобный) характер, способствуя отчасти, при осуществлении дальнейших эмансипаций ребенка, развитию его творческих способностей. Данная процессуальность будет объясняться преимущественно в рамках природы аттрактора Плыкина (рис. 2). Однако здесь имеется интересная особенность, заключающаяся в том, что до 2,5–3 лет у ребенка преобладает функционирование бессознательного, так как бессознательное — это не просто нагромождение прошлых мыслей, а конгломерат будущих связей психических ситуаций и творческих идей. Фактически мозг человека, в рамках природы гомеостатического ФГК, математически формирует объективную (иллюзорную) реальность из разных более глубоких имплицитных уровней реальности. Данный процесс — формирование объективной (иллюзорной) реальности из глубоких имплицитных уровней реальности, где функционирует преимущественно бессознательное — осуществляется со сплошной (верхней) линии множества Кантора (рис. 1), которое интерпретируется нами в одной из работ [1].

Эта особенность, отражающая функционирование преимущественно бессознательного, касается также развития природы сознания, начиная с 2–3-летнего развития ребенка. Здесь для объяснения развития природы сознания будет использоваться сплошная (верхняя) линия ФГК-аттрактора множества Кантора (рис. 1), отражая собой работу репеллеров. Что касается репеллеров, то они, хотя и обладают процессом самоорганизации и эмерджентности, отражают, прежде всего, сознательные мысли ребенка в развитии природы его сознания на ЭУР.

И последнее, познание развития природы сознания у ребенка, в рамках фрактально-голографической процессуальности, на наш взгляд, будет соответствовать дальнейшему своему развитию в рамках «парадигмы числового поля» [6], а также Всеединой теории поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатых Б. А. Синхронистичность в мире живого и неживого и парадигма числового поля. *Эволюционная и сравнительная психология в России: Современные исследования* / Отв. ред. И. А. Хватов, А. Н. Харитонов, В. В. Гаврилов. М.: Московский институт психоанализа — Когито-Центр; 2021. С. 43–54.
2. Смейл С. Дифференцируемые динамические системы. *УМН*. 1970;25(1):113–185.
3. Ruelle D., Takens F. On the Nature of Turbulence. *Commun. Math. Phys.* 1971;20:167–192; 1971;23:343–344.

4. Плыкин Р. В. Источники и стоки А-диффеоморфизмов поверхностей. *Математический сборник*. 1974;94(2):243–264.
5. Богатых Б. А. *Фрактальная природа живого: Системное исследование биологической эволюции и природы сознания*. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»/URSS; 2012. 256 с.
6. Богатых Б. А. Фрактально-голографический конструкт и теория поля К. Левина. *Национальный психологический журнал*. 2018;2(30):123–134.
7. Богатых Б. А. Системная психофизиология и психофизиологическая проблема. *Сложные системы*. 2017;3:62–76.
8. Bohm D. A New Theory of Relationship of Mind and Matter. *Journal of the American Society for Psychological Research*. 1986;80(2).
9. Bohm D. *Wholeness and the Implicate Order*. London: Routledge & Kegan Paul; 1980.
10. Горский Ю. М. *Основы гомеостатики: Гармония и дисгармония в живых, природных, социальных и искусственных системах*. Иркутск: ИГЭА; 1998. 337 с.
11. Mandelbrot B. B. *The fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman; 1982. 460 p.
12. Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности*. М.: Мир; 1991. 367 с.
13. Penrose R. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. New York: Penguin Book; 1987.
14. Репин В. С., Ржанинова А. А., Шаменков Д. А. *Эмбриональные стволовые клетки: фундаментальная биология и медицина*. М.: Реметэкс; 2002. 176 с.
15. Фромм Э. *Искусство любить*. СПб.: Азбука; 2001. 219 с.
16. Леонтьев А. Н. *Деятельность. Сознание. Личность*. М.: Смысл: ИЦ «Академия»; 2004. 352 с.
17. Анохин П. К. *Избранные труды. Кибернетика функциональных систем*. М.: Медицина; 1998. 397 с.
18. Александров Ю. И. Теория функциональных систем и системная психофизиология. *Синергетика и психология: Тексты: Вып. 3: Когнитивные процессы* / Под ред. В. И. Аршинова, И. Н. Трофимовой, В. М. Шендяпина. М.: «Когито-Центр»; 2004. 416 с.
19. Александров Ю. И., Швырков В. Б. Латентные периоды и синхронность разрядов нейронов зрительной и соматосенсорной коры в ответ на условную вспышку света. *Нейрофизиология*. 1974;6(5):551–553.
20. Roelfsema P. R., Engel A. K., Konig P., Singer W. Visuomotor Integration is Associated with Zero Time-Lag Synchronization Among Cortical Areas. *Nature*. 1997;385:157.
21. Брушлинский А. В. *О природных предпосылках психического развития человека*. М.: Знание; 1977. 61 с.
22. Леонтьев А. Н. Воля. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14. Психология*. 1993;2:3–14.
23. Юнг К. Г. *Синхронистичность*. Рефл-Бук Ваклер; 1997. 320 с.
24. Davies P. *The Cosmic Blueprint*. New York: Simon & Schuster; 1988. 240 p.
25. Плыкин Р. В. К проблеме топологической классификации странных аттракторов динамических систем. *УМН*. 2002;57(6):123–166.

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 30.09.2024.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 5,2. Уч.-изд. л. 7,7.

Цена свободная.