



ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2024
T. 5 № 1

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 5
№ 1**

**Vol. 5
No. 1**

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

Сойфер 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 автоматизации 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

Земто 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

Садыков Тимур Наилевич

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, Yugra State University, Khanty-Mansiysk

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

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

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

Prof. *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

Timur N. Sadykov

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

Поздравляем с получением государственных наград!	6
Т. В. Гавриленко, В. А. Галкин	
Интуитивные логические системы и их приложения в технологиях искусственного интеллекта	8
А. Е. Дашевский	
Моделирование пористой среды при помощи сетевой модели	17
Е. В. Страшнов, И. Н. Мироненко	
Имитационное моделирование инерциальных датчиков в системах виртуального окружения	24
Д. В. Горбунов, А. В. Гавриленко, А. Ю. Кухарева, Е. А. Манина	
Возможности энтропийного подхода в оценке биомеханических параметров человека	34
Д. А. Абраменко, К. И. Бушмелева	
Анализ точности методов прогнозирования финансовых результатов франчайзинга	40
В. З. Манусов, Г. В. Иванов, Е. Ю. Кислицин, С. В. Горелов	
Повышение пропускной способности воздушной линии с помощью вольтодобавочного трансформатора	47
Л. Л. Семенова	
Сравнительный анализ энергоэффективности иерархических протоколов передачи данных в территориально распределенных беспроводных сенсорных сетях	54
Ю. Н. Смыков, Е. Ю. Кислицин, М. Н. Иванов	
Управление процессами системы электроснабжения силовых электроприемников при провале напряжения	61
В. Б. Тютюнник, Р. С. Сазиков, Э. Г. Тунян, Л. Г. Ключ	
Сопровождение неврологических пациентов в период амбулаторного лечения	69
М. В. Юрчишина, К. И. Бушмелева	
Система ограничений задачи оптимизации учебного плана для направления «Информатика и вычислительная техника»	82

CONTENTS

Congratulations on Winning The Government Awards!	6
T. V. Gavrilenko, V. A. Galkin	
Intuitive Logical Systems and Their Applications in Artificial Intelligence Technologies	8
A. E. Dashevsky	
Porous Media Modeling With The Network Model	17
E. V. Strashnov, I. N. Mironenko	
Simulation of Inertial Sensors in Virtual Environments	24
D. V. Gorbunov, A. V. Gavrilenko, A. Yu. Kukhareva, E. A. Manina	
Entropy-Based Approach To Assessing Human Biomechanical Parameters	34
D. A. Abramenko, K. I. Bushmeleva	
Accuracy Assessment for Franchising Financial Forecasting Methods	40
V. Z. Manusov, G. V. Ivanov, E. Yu. Kislitsin, S. V. Gorelov	
Increasing the Overhead Power Line Capacity Using a Booster Transformer	47
L. L. Semenova	
Comparative Analysis of the Energy Efficiency of Hierarchical Data Transmission Protocols in Geographically Distributed Wireless Sensor Networks	54
Yu. N. Smykov, E. Yu. Kislitsin, M. N. Ivanov	
Managing Power Supply to Electrical Loads Voltage Dip Conditions	61
V. B. Tyutyunnik, R. S. Sazikov, E. G. Tunyan, L. G. Klus	
Follow-Up Care for Neurological Outpatients	69
M. V. Yurchishina, K. I. Bushmeleva	
Constraints for the Computer Science Major Curriculum Optimization Problem	82

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ПОЛУЧЕНИЕМ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАГРАД!

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации № 91 от 5 февраля 2024 года за большой вклад в развитие отечественной науки, многолетнюю плодотворную деятельность и в связи с 300-летием со дня основания Российской академии наук награждены государственными наградами Российской Федерации главный редактор и члены редакционной коллегии нашего журнала!

Орденом Александра Невского:

главный редактор — Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН;

члены редакционной коллегии — Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН – филиала ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент Московского института электронной техники.

Орденом «За заслуги перед Отечеством» III степени — Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, вице-президент РАН.

Медалью ордена «За заслуги перед отечеством» I степени — Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., заместитель директора по приоритетному технологическому направлению, заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, первый заместитель директора ИТМФ — начальник НИО.

В соответствии с распоряжением Президента Российской Федерации № 32-рп от 5 февраля 2024 года за заслуги в развитии отечественной науки, многолетнюю плодотворную деятельность и в связи с 300-летием со дня основания Российской академии наук объявлена благодарность Президента Российской Федерации Крыжановскому Борису Владимировичу, члену-корреспонденту РАН, д. ф.-м. н., руководителю Центра оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

Редакционная коллегия поздравляет коллег с получением высоких государственных наград и желает дальнейших достижений на благо развития отечественной науки!

Вручение орденов в Российской академии наук.
Слева от награждаемых — Президент РАН Г. Я. Красников;
справа — помощник Президента Российской Федерации А. А. Фурсенко



Академику РАН В. Б. Бетелину



Академику РАН В. Я. Панченко



Академику РАН Г. И. Савину



Академику РАН Ю. А. Чаплыгину

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-01

ИНТУИТИВНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Т. В. Гавриленко^{1,2,a}, В. А. Галкин^{1,2,b}

¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, ✉ taras.gavrilenko@gmail.com

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены задачи построения интуитивных языковых образов, связанных с идеями построения искусственных нейронных сетей (ИНС), широко и без надлежащего строгого математического обоснования применяемых в технологиях искусственного интеллекта (ИИ). Работа нацелена на выявление семантики, необходимой для создания строгого математического основания будущей теории ИНС и ИИ. Принципиальным моментом указанных технологий является понятийный аналитический аппарат, создаваемый интеллектом Человека-пользователя в рамках его информационной среды, в которой ИНС и ИИ выступают как вспомогательные быстродействующие средства. Они способствуют решению задач, сформулированных в рамках общечеловеческой интуитивной языковой среды. В контексте развиваемого подхода определены метрики в пространствах решений, в частности, в задачах визуального корреляционного анализа, применяемого для эффективного выявления связей экспериментальных наблюдений. Представлены понятия теории и семантической значимости, определяемой Человеком. Показаны возможные ограничения в технологиях ИИ, основанные на особенностях человеческого мышления и языковых систем.

Ключевые слова: интуитивные логические системы, визуальный корреляционный анализ, искусственные нейронные сети, искусственный интеллект, алгоритм, теории, семантическая значимость.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Гавриленко Т. В., Галкин В. А. Интуитивные логические системы и их приложения в технологиях искусственного интеллекта. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):8–16. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-01.

Поступила в редакцию: 22.01.2024.

В окончательном варианте: 01.03.2024.

INTUITIVE LOGICAL SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

T. V. Gavrilenko^{1,2,a}, V. A. Galkin^{1,2,b}

¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, ✉ taras.gavrilenko@gmail.com

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9721-4026>, val-gal@yandex.ru

Abstract: the paper considers the construction of intuitive language images related to the concept of artificial neural networks (ANN) which are extensively used and without proper, rigorous mathematical justification applied to artificial intelligence (AI) technologies. This work aims to identify the semantics for creating a rigorous mathematical foundation for the future theory of ANNs and AI. A fundamental aspect of these technologies is the conceptual analytical apparatus created by the intelligence of the Human in their information environment, in which ANN and AI act as auxiliary, fast-acting tools. They contribute to the solution of tasks formulated within the framework of the universal intuitive language environment. In the

context of the developed approach, metrics in solution spaces are defined, in particular, in the tasks of visual correlation analysis applied to efficiently reveal the relationships of experimental observations. The concepts of theory and semantic relevance as defined by Man are presented. Possible limitations in AI technologies based on the peculiarities of human thinking and language systems are shown.

Keywords: intuitive logical systems, visual correlation analysis, artificial neural networks, artificial intelligence, algorithm, theories, semantic relevance.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Gavrilenko T. V., Galkin V. A. Intuitive Logical Systems and Their Applications in Artificial Intelligence Technologies. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):8–16. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-01.

Original article submitted: 22.01.2024.

Revision submitted: 01.03.2024.

Перспективным направлением построения и обоснования сходимости алгоритмов, используемых в технологиях построения ИИ, на основе динамически изменяющихся (последовательно уточняющихся) правил f_n для преобразования входной информации [1]:

$$x_{n+1} = f_n(x_n) \quad (1)$$

в иерархии ИНС, которые составляют структуру ИИ, является применение теорем о неподвижных точках на локально выпуклых и упорядоченных пространствах, связанных с работами А. Н. Тихонова, Ю. Шаудера и А. Тарского [2]. Эти теоремы позволяют во многих практических задачах для ИНС, основанных на сохраняющих порядок непрерывных отображениях, построить конструктивные сходящиеся алгоритмы к наименьшей (наибольшей) неподвижной точке. В частности, это утверждение имеет глубокие приложения в формальной семантике языков программирования (в абстрактной интерпретации — теории аппроксимации семантики компьютерных языков, связанной с именами П. и Р. Кузо [3]). Формализация процесса решения напрямую связана с интуитивным понятием алгоритма, называемым гипотезой, или «тезисом Черча» [4].

Следует подчеркнуть, что не существует четких математических определений ИНС и ИИ, которые составляют вспомогательную часть языковой среды, используемой носителем Интеллекта — Человеком (НИЧ). В конечном счете вспомогательная роль ИНС и ИИ определяет их вторичность по отношению к каждому конкретному НИЧ, который, используя ИНС и ИИ в своей практической деятельности, интерпретирует предлагаемые варианты выводов, полученных в этих системах на основе персональной семантики и своего синтаксиса. В основе языка всегда лежат интуитивно принимаемые предложения (семантические образы), употребление которых основано на соглашениях (синтаксических правилах), порождающих возможность построения так называемых логических выводов в виде конструкции «если, ...» — «то, ...».

Понятие «доказательство» в обыденном его употреблении (в смысле получения аргументированной последовательности «убедительных выводов») представляется способом общения носителей интеллекта (людей) с целью психологического (интеллектуального) убеждения друг друга в рамках выбранной этим сообществом некоторой языковой среды. «Со времен древних греков говорить “математика” — значит говорить “доказательство”» [5, с. 23].

Любой язык представляет собой предмет договора между людьми. Не существует способа передачи математических образов без использования естественного языка, который и формирует математические понятия и отношения. В неявном виде существует договор об использовании первичных понятий, и различные группы людей, в том числе и математиков, могут иметь различное толкование первичных понятий, что порождает различные математические школы, направления и теории. Человеческий разум может породить практически любую аксиоматику. Соответственно, одна и та же задача может иметь множество решений в различных понятийных пространствах.

В связи с вышесказанным необходимо отметить, что во многочисленных вычислительных экспериментах по распознаванию образов, обработке акустической, видео- и текстовой информации были найдены подходы к созданию программного обеспечения для практического решения ряда трудно

формализуемых задач. Эти успехи породили огромный поток работ и интерес к созданию полуэмпирических методов, носящих название «ИНС». Они составляют основу информационных технологий, которые принимаются за основу работы систем, называемых «ИИ». Общий подход, лежащий в основе построения ИНС, состоит в принятии гипотезы возможности создания устройства, которое можно обучить на серии примеров принятия решений [6].

Эта размытая формулировка предполагает наличие некоторой связи между выбранными парами объектов $(x, y) \in X \times Y$, определяющей некоторое отношение $R \subset X \times Y$ (гипотетический закон) [1]. Обычно предполагается, что R является функцией (т. е. каждому значению $x \in X$ соответствует ровно одно значение $y \in Y$). Набор обучающих примеров составляет заданное подмножество $\bar{R} \subset R$, где отношение R априори неизвестно. Целью создания ИНС является в некотором смысле «оптимальная реконструкция» неизвестного отношения R на основе заданного «обучающего» набора $\bar{R}$. По своей природе такая постановка задачи является некорректной. В конечном счете это задачи оптимальной интерполяции в заданных функциональных пространствах, снабженных соответствующими метриками или топологиями. Здесь важен выбор оптимизационного правила НИЧ, восходящий к идеям и принципам наименьшего действия в работах Лагранжа, Гамильтона, Эйлера и построению многочленов П. Л. Чебышёва, наименее уклоняющихся от нуля [6].

Вопросы практического применения ИНС и технологий ИИ с точки зрения логики их использования для «решения задач» (без четкой семантики употребления терминов «задача» и «решение») имеют аналоги в истории математики, например, в связи с великим открытием XVII в. — созданием основ анализа бесконечно малых (основ дифференциального и интегрального исчисления в работах Лейбница и Ньютона). С этой точки зрения, технологии современных ИНС и ИИ представляют собой широкий спектр интуитивных логических систем, в частности, в рамках математической логики допускающих бесконечный спектр интерпретаций, в соответствии с теоремой Сколема–Левенгейма [7].

Более того, классические теоремы Геделя [7] гарантируют существование невыводимых предложений, а само понятие алгоритма в своей основе имеет гипотезу о совпадении интуитивного алгоритма [7] и построения выводов, получающихся в результате применения рекурсивных вычислений, которые используют алгоритм машины Тьюринга [7, 8].

Таким образом, рассуждения о том, что системы, основанные на технологиях ИИ, могут превзойти НИЧ, являются отголосками многочисленных легенд из истории человечества, в частности, легенды о Големе [9].

Принципиальным является другой вопрос: об общественном характере применения результатов, получаемых конкретным НИЧ на основе используемых технологий ИНС и ИИ, и его персональной ответственности, что не является предметом настоящей работы.

В связи с многочисленными инженерными конструкциями, называемыми ИНС, важным элементом научных исследований является так называемая «научная визуализация». Она широко применяется при исследовании многопараметрических потоков данных большого объема (Big Data), которые нацелены на ускорение процесса выявления возможных закономерностей, связывающих их с проводимыми наблюдениями. В этом отношении заметное место занимает построение ИНС на основе сочетания геометрического вложения упорядоченных параметризованных потоков Big Data в многообразия $M \subset \mathbb{R}_n$, позволяющих исследователю визуально выделять и оценить математическими средствами возможные зависимости (корреляции). Такой подход аналогичен построению фигур Лиссажу [10] в $\mathbb{R}_2$ и позволяет существенно ускорить процедуру поиска возможного «решения» задачи о наличии структуры (отношений) малой размерности, на которые может стратифицироваться множество исходных данных, имеющее значительную мощность $\text{cardBigData} \sim \aleph_0$. Поиск решений новых и сложных задач требует от Человека способности исследовать задачу на основе различных подходов к понятийной среде, определять возможные варианты решения. Использование таких подходов, как поиск аналогий, подобия, похожести и сопоставление, дает возможность разуму человека находить нестандартные и неочевидные решения (например, решение изобретательских задач).

Особенно ярко это проявляется в задачах, которые не имеют решения в рамках заданной системы непротиворечивых определений и существование которых выводится на строгой основе математической логики. Типичной иллюстрацией тому является «классическая» задача для системы линейных алгебраических уравнений, когда ранг расширенной матрицы больше ранга матрицы системы (переопределенная задача, не имеющая классического решения в силу теоремы Кронекера–Капелли [11]).

Однако практические задачи, которые связаны с необходимостью обработки многочисленных измерений (Big Data), приводящие естественным образом к переопределенным (некорректным) задачам, заставили изменить понятие решения, заменив классическое определение на «обобщенное решение», дающее минимум невязки системы уравнений в заданной метрике пространства данных (А. М. Лежандр [12], К. Ф. Гаусс [13]).

Эти идеи были положены в основу общего подхода в теории обобщения понятия решения дифференциальных уравнений (С. Л. Соболев [14], К. О. Фридрихс [15], Л. Шварц [16], А. Ф. Филиппов [17], В. А. Галкин и В. Б. Бетелин [18, с. 21]).

В основе понятия обобщенного решения лежит идея расширения исходного пространства решений и топологического продолжения операторов, входящих в исходную задачу так, чтобы продолженная задача в расширенных пространствах имела «обобщенное решение», которое совпадает с классическим при его наличии.

Построение модели ИНС может рассматриваться как задача об отыскании неподвижной точки $\bar{X}$ ($\bar{x} = f(\bar{x})$) для некоторого отображения $f : M \rightarrow M$ на множестве данных $M \supset X \cup Y$. Выбор отображения f назовем слоем ИНС. По существу, построение слоя ИНС является этапом построения многослойной ИНС, состоящей из последовательно применяемых преобразований — слоев $f_n : M \rightarrow M$, которые последовательно модифицируются пользователем для достижения некоторого «оптимального, идеального для пользователя» результата. Искомый результат представляет собой неподвижные точки некоторого предельного преобразования $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$ [1].

Математические задачи построения ИНС на основе многочленов многих переменных естественным образом связаны с приближением достаточно гладких отображений частичными суммами соответствующего ряда Тейлора, что требует вычисления оценок производных неизвестной функции на обучающем множестве. Это приводит к необходимости решения интегральных уравнений Вольтерра (Фредгольма) 1-го рода типа свертки с приближенно заданной правой частью. Собственно говоря, этот подход положен в основу популярного названия «сверточные ИНС». Отметим, что уравнение Фредгольма 1-го рода на пространстве суммируемых функций является типичной некорректной задачей, обладающей выраженной вычислительной неустойчивостью, которая преодолевается на основе методов регуляризации А. Н. Тихонова [19].

Следует подчеркнуть, что в некотором смысле наиболее адаптированной к технологии ИНС, разработанной и универсальной является теория вычислительных методов для линейных задач. Поэтому с этой точки зрения важными являются процедуры «погружения» нелинейных задач в общие классы линейных за счет изменения исходной размерности описания и расширения функциональных пространств [20].

Отмеченное выше погружение нелинейных систем в линейную динамику может быть универсальным образом реализовано в рамках концепции функциональных решений для квазилинейных систем на основе вложения Янга соболевских обобщенных решений в пространство линейных функционалов, снабженное тихоновской топологией [21, 22].

Построение цепочки слоев ИНС должно подчиняться модификациям, гарантирующим сходимость итераций.

Человек обладает уникальной способностью исследовать, анализировать и интерпретировать окружающую действительность, а также искать решения не только известных, но и новых задач, проблем. Анализ и исследование окружающего мира, в первую очередь, осуществляются через органы чувств. Около 90 % воспринимаемой информации — это зрительная информация. Человек способен строить гипотезы, искать решения, в том числе неразрешимых задач, создавать новые теории. Существует множество различных подходов к формализации алгоритма и процедуры принятия решения, но инвариантный подход к определению так и не найден. В широком смысле понятие алгоритма эквивалентно математическим методам. Реализация алгоритма и решения задачи ограничены только границами человеческого познания.

Существует множество определений понятия «задача», которые связаны с различными аспектами человеческой деятельности. В общем смысле обычно под задачей понимают некоторую проблемную ситуацию, которую необходимо разрешить для достижения некоторой цели. В [23] определяется три составных элемента задачи:

- элементы ситуации;

- правила преобразований ситуации;
- требуемое решение или цель задачи.

Ключевым элементом является наличие проблемной ситуации, которую определяет человек. Только человек может определить и сформулировать новую проблемную ситуацию. Если задача решена в том или ином виде, тогда может быть автоматизирована процедура формирования задач, отличающихся только параметризацией.

В математическом смысле любая задача как проблемная ситуация содержит в себе множество исходных объектов (параметров, свойств, данных и т. д.), множество целевых объектов — неизвестных и множество допустимых отношений. Целью является либо поиск неизвестных объектов и последовательности отношений, определяющей неизвестные объекты, либо отыскание последовательности отношений между исходными и целевыми объектами. Введем следующие обозначения:

• $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_w\}$, $w \in N$ — множество объектов пространства, на котором определена задача (проблемная ситуация);

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, $k \in N$, $A \subset Q$ — множество исходных объектов;
- $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $m \in N$, $B \subset Q$ — множество целевых объектов;
- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, $n \in N$ — множество отношений;
- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_h\}$, $h \in N$ — множество допустимых правил применения отношений.

В наиболее общем виде логическая система представляет собой отношения вида *если* (A), *то* (B), или $A \rightarrow B$. При этом истинность, ложность или допустимость преобразования определяется аксиоматикой и пониманием используемых понятий человеком. Правила применения отношений F определяются следующим образом:

$$f_k = \{e_\alpha, q_\beta, q_\gamma\}, \quad e_\alpha \in E, \quad q_\beta \in Q, \quad q_\gamma \in Q, \quad k = [1, h]. \quad (2)$$

Множество отношений E и правил применения отношений F (логическая система) позволяют сформировать последовательности, цепочки применения отношений. В результате решение задачи определяется последовательностью допустимых отношений $D = d_1 d_2 \dots d_l$, $d_i \in F$, $l \in N$. Отношения могут выстраиваться в иерархии, следовательно, любая последовательность D может рассматриваться как отношение более высокого порядка.

В зависимости от аксиоматики и понимания отношений, первичных понятий, решения задачи могут отличаться. Различия в понимании исходных первичных понятий и отношений приводят к формированию новых отношений, и, как следствие, формируется множество отношений $E' = \{e'_1, e'_2, \dots, e'_u\}$, $u \in N$. $E \cap E' = \emptyset$, если аксиоматика, понимание исходных первичных понятий и отношений эквивалентны, и $E \cap E' \neq \emptyset$, если существуют различия. Во втором случае решения задач могут отличаться как в целевых объектах, так и в последовательностях применения отношений.

Если задача не имеет решения, тогда $D = \emptyset$. Если решение в заданном допустимом пространстве отношений существует, тогда существует такое D , что $D \neq \emptyset$. Если задача имеет множество решений, D_j — j -е решение задачи ($j = \overline{1, r}$, r — количество решений задачи), тогда множество всех возможных решений $S = \bigcup_{j=1}^r D_j$. При этом S может содержать как эквивалентные решения $a_x D_j b_y$, $a_x D_i b_y$ ($x = [1, k]$, $y = [1, m]$), так и не эквивалентные $a_x D_j b_y$, $a_x D_i b_y^*$, где b_y^* — это некоторое приближение к b_y . В результате может быть сформулировано формальное определение алгоритма.

Алгоритм — это любая последовательность отношений D , каждый элемент которой определен на F .

Одна из сложнейших задач — сопоставление результатов решения задачи, могут возникать парадоксы, неразрешимые противоречия и недостижимость цели — решения задачи. Разрешение парадоксов, противоречий — это фактически процедура согласования, формирования новых договоренностей и в общем случае языка. Создание новой системы отношений, образов и, в конечном счете, языка — это принципиальная способность человеческого разума, недостижимая для машинного интеллекта.

Выбор эффективного решения из множества решений S , то есть выделение такого $D_j \in S$, которое удовлетворяло бы поставленным целям, можно сравнить с известной задачей «О разборчивой невесте», сформулированной Мартином Гарднером в 1960 году. Решение данной оптимизационной задачи позволяет определить стратегию поведения и ответить на вопрос, с какой вероятностью может быть определен наилучший вариант решения задачи для условной невесты. Поиск наиболее эффективного решения из множества вариантов связан с перебором вариантов и сопоставлением по некоторому критерию эффективности. Отыскание точного, эффективного или оптимального решения — одна

из центральных проблем математического моделирования и математики в целом. Например, при использовании асимптотических рядов в задачах небесной механики еще А. Пуанкаре обнаружил, что большое количество членов ряда приводит к неустойчивости решения и задача исследователя становится сопоставимой с задачей «О разборчивой невесте», в части выбора члена ряда (то есть выбор оптимального D_j из S), на котором следует остановиться и получить наиболее эффективное решение.

Множество отношений E не является инвариантным и изменяется при появлении новых знаний и понятий. Например, одно из величайших достижений Декарта — переход от числового, формального представления функций к графическому образу, который дает человеку эффективное зрительное восприятие математических объектов. Переход к графическим образам дал совершенно иное понимание закономерностей в окружающем мире и существенно изменил подходы к формированию решений и последовательности применения отношений.

В [1] рассмотрены алгоритмы, обладающие такими свойствами. Особую роль играет не столько формат описания объекта, исходных данных и их количества, сколько форма представления. Одним из самых эффективных методов оптимизации решений и поиска отношений для эффективного построения ИНС на интуитивных логических принципах является визуальный корреляционный анализ. Визуальный корреляционный анализ — это метод обнаружения и выявления скрытых структур и закономерностей, получения ограничений и свойств исследуемых объектов, выявления взаимосвязей в случайных величинах, решения задач аппроксимации на основе графических форм представления информации. По своей сути технологии построения ИНС, основанные на визуальном корреляционном анализе, конкретизируют работу [1] для итерационных динамически изменяющихся ИНС. Общий подход к технологиям построения ИНС визуального корреляционного анализа и детализация обоснования сходимости соответствующих им алгоритмов (1) основывается на следующей теореме.

Теорема (Сходимость интуитивных алгоритмов визуального корреляционного анализа).

Пусть для исходного объекта a образа существует пространство решений B , aGb , $b \in B$, $\Gamma > 0$, тогда визуальный корреляционный анализ допускает оптимальное решение задачи и сходится к решению из пространства решений.

Доказательство. Пусть a — исходный объект, b — искомый объект (решение задачи). Множество всех возможных отношений — $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, $n \in N$. По аналогии с нумерацией Геделя [24] множество отношений можно рассматривать как алфавит для формирования числового отображения процедуры решения задачи. Дополнительно можно ввести требование, что значения в нумерации присваиваются в зависимости от сложности реализации отношения или времени выполнения отношения. Решение задачи представимо в виде aGb , где G — рассуждение (последовательность отношений):

$$G = g_1 g_2 \dots g_l; \quad g_k \in E; \quad k = \overline{1, l}; \quad l \in N, \quad (3)$$

где l — длина рассуждения, g_k — отношение на k -ом шаге, E — пронумерованное пространство отношений. Можно рассматривать также $g_k \in F$, где F — пронумерованное пространство допустимых отношений. Т. к. G — числовое представление, введем отношение:

$$\Gamma = \frac{1}{G}; \quad G \neq 0; \quad \Gamma = (0, 1]. \quad (4)$$

При $G \rightarrow \infty$, $\Gamma \rightarrow 0$, $\Gamma \neq 0$. Любой алгоритм с количеством операций, стремящимся к бесконечности, приводит к $\Gamma \rightarrow 0$. Для числового представления рассуждений G_c и G_d введем метрику $\rho(G_c, G_d)$ — расстояние между двумя числовыми представлениями рассуждений. При $\rho = 0$, $G_c = G_d$, $\rho \neq 1$ для любых значений G_c, G_d , $\rho = [0, 1)$, пространство состояний неполно. При $\rho \rightarrow 1$ модуль разности $|G_c - G_d| \rightarrow \infty$. Величину Γ можно рассматривать как вероятность решения задачи за конечное время или показатель скорости сходимости алгоритма, решения aGb . Пусть a — исходный объект, образ G_s — исходное числовое представление рассуждения, b_s — искомое решение задачи. Причем пространство решений $B \neq \emptyset$, $b_s \in B$.

Для задач неограниченно возрастающей размерности справедливо соотношение: $\Gamma_s \rightarrow 0$, если $G \rightarrow \infty$.

Повышение эффективности решения или оптимизация решения — это поиск такого G_r , что $G_s \gg G_r$ и в идеальном варианте $\rho(\Gamma_s, \Gamma_r) \rightarrow 1$.

Визуальный корреляционный анализ позволяет на основе опыта и зрительного восприятия исследователя сократить количество отношений в рассуждении, то есть определить новые отношения и

их последовательности $G_{new} \subset G_r$, такие что $|G_{new} - G_{sub}| > 0$, $G_{sub} \subset G_s$, метрика $\rho > 0$. Необходимо отметить, что G_s и G_r могут быть не эквивалентными, то есть aG_sb_s и aG_rb_r , при этом $b_s \in B$ и $b_r \in B$. Итерационное сокращение количества отношений при условии $|G_{new} - G_{sub}| > 0$ приводит к росту G_r , как следствие, вероятность и скорость решения задачи возрастают. Таким образом, заключаем, что процедура визуального корреляционного анализа сходится.

Теорема доказана.

Для задачи aGb решение может быть не единственным, то есть решения могут быть точными и приближенными. Точные решения могут быть зафиксированы и определены как инвариантные. В практических задачах приближенные решения сложных задач преобладают.

Представления $G_{sub} \subseteq G$ будем называть числовым представлением G , при этом $\bigcup G_{sub} = G$. Рассуждения G_c и G_d будем называть эквивалентными, если выполняются отношения aG_cb , aG_db , при этом $G_c \neq G_d$, эквивалентными могут быть числовое представление отдельного отношения и числовые представления, например, $g_k = G_{sub}$, где $G_{sub} \leq G$.

Оптимизация решения может быть определена как преобразование некоторого рассуждения G_c в G_d при условии aG_cb , aG_db и $G_c > G_d$. Примером такого преобразования может служить школьная задача по упрощению выражения. Если решение задачи не единственное, тогда может быть определено пространство решений B , где $\forall$ решение $b \in B$ удовлетворяет заданным требованиям и ограничениям. Пусть $b_c \in B$ и $b_d \in B$ — два решения из пространства решений, если b_c — точное решение, b_d — приближенное решение, тогда при $G_c \gg G_d$ — переход к приближенному решению эффективен, при $G_c \leq G_d$ — неэффективен.

Аналогично и при b_c — приближенное значение, b_d — приближенное решение, но при этом необходимо учитывать требования и ограничения на множество решений.

Введем следующие обозначения:

- $O = \{O_1, O_2, \dots, O_w\}$, $w \in N$ — множество исходных объектов (алфавит, знаки, объекты и т. п.);
- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, $n \in N$ — множество утверждений (аксиоматика, законы, решения и т. д.);
- $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$, $m \in N$ — множество морфизмов (отношений);
- $V = \{V_1, V_2, \dots, V_l\}$, $l \in N$ — множество правил применения морфизмов (правил логического вывода), $l \in N$.

$\forall$ утверждение $P_b \in P$ представляет упорядоченное множество, состоящее из элементов множества O . $E_a : P_b \rightarrow P_c$ — морфизм (отношение), $E_a \in E$, $a = [1, m]$, $P_b \in P$, $P_c \in P$, $b = [1, n]$, $c = [1, n]$, тогда $\forall$ морфизм может быть доопределен:

$$V_k = \{E_a, P_b, P_c\}, \quad k = [1, l]. \quad (5)$$

Последовательность доопределенных морфизмов представима в виде рассуждения:

$$S = s_1 s_2 \dots s_h, \quad h \in N, \quad (6)$$

где $s_i \in V$, $s_i = V_d$, $i = [1, h]$, $d = [1, l]$, при этом $V_d \in V$, h — длина рассуждения. Элементы множества V могут быть пронумерованы и, следовательно, получено числовое представление — G аналогично (3).

Необходимо отметить, что V — это граф всех возможных утверждений предметной области. Рассуждение S является подграфом. В такой постановке визуальный корреляционный анализ направлен на решение задачи быстрого поиска отношений между узлами за счет сокращения пространства отношений.

Пусть множество Q является объединением всех возможных рассуждений S , $Q = \bigcup S$, тогда в пределе $|Q| \rightarrow \aleph_0$. Такие множества могут быть представлены, но большинство элементов таких множеств не несут никакой семантической нагрузки (бессмысленны). Например, можно взять алфавит и случайным образом из символов алфавита формировать слова (утверждения в данном контексте), а далее и рассуждения. Подавляющее большинство сформированных текстов не будет иметь никакого смысла. Точно так же можем сформировать программу на том или ином языке программирования, применить математические операторы и т. д.

Обозначим z семантическую значимость, например, истинность некоторого рассуждения, $\bar{z}$ — отсутствие семантической значимости, например, ложность. Семантическая значимость может рассматриваться как бинарное отношение, например, истина и ложь, и иметь множество различных значений, например, точное значение, приближенное значение с заданной точностью. В результате

$z = \{z_1, z_2, \dots, z_\tau\}$, $\tau \in N$, а $\bar{z}$ — это любое значение, которое не входит в пространство z . При этом семантическая значимость определяется создателем некоторой теории. Введем понятие теории, множество $T = \{T_1, T_2, \dots, T_t\}$ будем называть теорией, при условии, что элемент теории T определяется следующим образом: $T_j = \{S, z\}$, $T_j \in T$. Для $\forall \bar{T}_i = \{S, \bar{z}\}$ справедливо $\bar{T}_i \notin T$.

Рассмотрим некоторую теорию T . Пусть существует невыводимое рассуждение S' , то есть не существует допустимой последовательности морфизмов, определенных на множестве V , при этом для S' определена семантическая значимость $T' = \{S', z\}$. Тогда T — неполна. Предположим, что T полна, тогда существует такое S'' и E'' , что $E'' : S'' \rightarrow S'$, тогда S' выводима, но S' невыводима, следовательно, S'' невыводима. Следовательно, любая теория по определению неполна. Визуальный корреляционный анализ — основной способ исследования морфизмов, определения семантической значимости, в том числе пополнения теории и проверки ее непротиворечивости. Кроме этого, визуальный корреляционный анализ позволяет эффективно решать задачу сопоставления, подобия, похожести, а также помогает в поиске топологических и иных инвариантов.

В историческом плане рождение и гибель любой теории можно рассматривать как итерационный и эволюционный процесс. Любая теория существует только до тех пор, пока не начинают проявляться непреодолимые противоречия в ней. В современном мире появление противоречивых данных приводит к необходимости переосмысления теоретических знаний. При этом исследователь, эксперт выполняет основополагающую функцию — определение семантической значимости результата и сопоставление с существующими утверждениями и рассуждениями. Человек способен не только выстраивать рассуждения, но и давать им оценку, определять наличие смысловой нагрузки. Человек выполняет функцию контроля и оценки. Оценка семантической значимости — ключевая процедура, фактически это отделение бессмысленного от имеющего смысл. Человек на основе ощущений, наблюдений и опыта определяет семантическую значимость.

Графическое отображение обладает высокой информационной значимостью, высокой эффективностью представления данных. Большие объемы данных, описывающих развитие некоторого процесса, могут быть параметризованы точками многообразия, вложенного в пространство. Таким образом, исследователь, используя визуальный корреляционный анализ, получает возможность анализа данных наиболее эффективными методами, в первую очередь, благодаря визуальной оценке графического представления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетелин В. Б., Галкин В. А. О неподвижных точках непрерывных преобразований, связанных с построением искусственных нейронных сетей. *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2022;507(1):22–25. DOI: 10.31857/S2686954322700035.
2. Данфорд Н., Шварц Дж. Т. *Линейные операторы. Общая теория*. Т. 1. М.: ИЛ; 1962.
3. Кузо П., Кузо Р. Абстрактная интерпретация: унифицированная решетчатая модель для статического анализа путем построения или аппроксимации неподвижных точек. *Протокол конференции 4-го симпозиума ACM по принципам языков программирования*. Лос-Анджелес, Калифорния, США; 1977. Р. 238–252.
4. Church A. An Unsolvability Problem of Elementary Number Theory. *American Journal of Mathematics*. 1936;58:345–363.
5. Бурбаки Н. *Теория множеств* / пер. с фр. В. А. Успенский. М.: Мир; 1965. 458 с.
6. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Математические задачи, связанные с искусственным интеллектом и искусственными нейронными сетями. *Успехи кибернетики*. 2021;2(4):6–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-4-1.
7. Эббинхауз Г.-Д., Якобс К., Ман Ф.-К., Хермес Г. *Машины Тьюринга и рекурсивные функции* / пер. с нем. М.: Мир; 1972. 262 с.
8. Успенский В. А. *Машина Поста*. 2-е изд., испр. М.: Наука; 1988. 96 с.
9. Idel M. *Golem: Jewish Magical and Mystical Traditions on the Artificial Anthropoid*. Albany, New York: State University of New York Press; 1990. 296 p.
10. Sierra C. A. Recurrence in Lissajous Curves and the Visual Representation of Tuning Systems. *Foundations of Science*. 2023. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10699-023-09930-z>. DOI: 10.1007/s10699-023-09930-z.

11. Курош А. Г. *Курс высшей алгебры*. 9-е изд. М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы; 1968. 431 с.
12. Legendre A. M. *Nouvelles Methodes Pour la Determination des Orbites des Cometes*. Paris; 1806. 80 p.
13. Gauss C. F. *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientium*. Hamburg; 1809. 246 p.
14. Соболев С. Л. *Избранные труды. Т. II. Функциональный анализ. Дифференциальные уравнения с частными производными*. Новосибирск: Издательство Института; Академическое издательство «Гео»; 2006. 689 с.
15. Фридрихс К. О. Асимптотические явления в математической физике. *Математика*, 1957;1(2):79–94.
16. Шварц Л. *Анализ*. Т. 1–2. М: Мир; 1972. 824 с.
17. Филиппов А. Ф. *Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью*. М.: Наука; 1985. 216 с.
18. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Универсальные вычислительные алгоритмы и их обоснование для приближенного решения дифференциальных уравнений. *Доклады Академии наук*. 2019;488(4):351–357. DOI: 10.31857/S0869-56524884351-357.
19. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач*. М.: Наука; 1986. 181 с.
20. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Математические и вычислительные проблемы, связанные с образованием структур в сложных системах. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2022;14(4):805–815. DOI: 10.20537/2076-7633-2022-14-4-805-815. EDN: FJIRVQ.
21. Галкин В. А. Теория функциональных решений квазилинейных систем законов сохранения. *Труды семинара имени И. Г. Петровского*. 2000;20:81–120.
22. Galkin V. A. Background of Mathematical Models, Based on Conservation Laws Systems. *Industrial Mathematics, Narosa Publishing House*. New Delhi, India; 2006. P. 159–178.
23. Тихомиров О. К. *Психология мышления: Учеб. пособие*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1984. 272 с.
24. Мендельсон Э. *Введение в математическую логику*. М.: Наука; 1971. 320 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-02

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ПОМОЩИ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

А. Е. Дашевский

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

 dashevsky.andry@gmail.com

Аннотация: в работе приводится краткий обзор сетевой модели пористой среды. Предложен способ построения фиктивного порового пространства, в основе которого лежит принцип сетевой модели пористой среды, и приведен образец расчета на примере задачи определения поля давления в пористой среде.

Ключевые слова: математическое моделирование, сетевая модель, керн, фильтрационные течения, поры, пористая среда.

Для цитирования: Дашевский А. Е. Моделирование пористой среды при помощи сетевой модели. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):17–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-02.

Поступила в редакцию: 13.02.2024.

В окончательном варианте: 05.03.2024.

POROUS MEDIA MODELING WITH THE NETWORK MODEL

A. E. Dashevsky

System Research Institute, Russian Academy of Sciences

 dashevsky.andry@gmail.com

Abstract: the article briefly describes the network model for porous media. The technique of fictional porous media construction, which based on network model principals, is proposed, as well as example of application of this technique for task of calculating pressure in porous media.

Keywords: mathematic modeling, network model, core sample, filtration flow, pores, porous media.

Cite this article: Dashevsky A. E. Porous Media Modeling With The Network Model. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):17–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-02.

Original article submitted: 13.02.2024.

Revision submitted: 05.03.2024.

Введение

В рамках изучения течений в пористых средах решается огромное количество задач в разных постановках: анализ процесса фильтрации в конкретных пористых средах [1], моделирование течения в поровых пространствах с учетом химического взаимодействия жидкостей [2], изучение процесса капиллярной пропитки [3] и множество других задач, связанных с анализом течений в пористых материалах [4–6]. Так или иначе каждый из исследователей, работающих с пористыми средами, сталкивается с необходимостью каким-либо образом моделировать сложную структуру таких сред. Математически это проявляется в определении коэффициента проницаемости, который зависит исключительно от характеристик внутреннего строения пор. Определение этого коэффициента и стало главной целью моделей геометрии порового пространства.

Для этого было предложено несколько эмпирических моделей пористой среды. Их можно разделить на два класса: гранулярные модели и каналные модели, — в описании каждого из которых имеются существенные проблемы. Для гранулярных моделей [7, 8], которые представляют пористую среду как множество круглых «гранул», основной проблемой является сложность получаемой геометрии пор [9]. Модель Козени в модификации Кармана [10], использующая площадь «гранул», относится к этому классу.

В то же самое время каналные модели, которые представляют пористые среды как множество однонаправленных каналов (например, в [11, 12]), дают относительно простые соотношения, однако не моделируют некоторые элементарные свойства пористой среды. Например, каналная модель представляет пористую среду анизотропной, хотя реальные образцы демонстрирует в общем изотропные свойства [13].

В [13] Фэтт предложил свою собственную модель пористой среды, которая представляла «сети» различной конфигурации (для простоты использовались двумерные модели). В этих моделях, в основе которых лежит течение в каналах, оно определялось законом Хагена–Пуазеля для круглого сечения.

В то же время Оуэн представлял пористую среду как набор ячеек, состоящих из «пор», и соединяющих каналов. В основе этой модели лежит предположение, что каналы вносят большее сопротивление, чем «поры», что обеспечивает высокое значение форм-фактора без введения высоких значений извилистости.

В основе сетевой модели, рассматриваемой в этой статье, лежит объединение идей моделей Оуэна и Фэтта. Элементом сетевой модели пор является объем жидкости («узел»), соединенный с другими элементами («каналами»), в которых (и только в них) происходит переток жидкости из одного объема в другой.

Описание модели

Модель состоит из двух типов узлов: внутренних и внешних. Внутренние узлы — это область «реального» порового пространства, в которой изучается течение жидкости. Она обладает своим объемом и может сообщаться с несколькими внутренними узлами посредством каналов, представляет основную ячейку модели. Внешние узлы — «фиктивные» элементы модели, они не имеют объема и могут сообщаться только с одним внутренним узлом и больше ни с какими элементами модели. Эти узлы есть граница расчетной области, в них мы будем задавать граничные условия при решении задач.

Модель содержит N узлов, причем множество номеров внешних узлов обозначим E , а множество номеров, связанных каналами с узлом n , обозначим B_n . Эти узлы мы называем соседними с узлом n . Тем самым имеем граф, заданный списком узлов и для каждого узла списком связей. Для внешних узлов имеем только один канал, связывающий их с остальной моделью — внутренними узлами.

Канал (связь) определяется двумя его узлами, практически идентифицируется узлом n и индексом j таким, что соседний узел $m_{n,j} \in B_n$, причем $1 \leq j \leq J_n$ (J_n — количество соседей узла n). Канал, определяемый парой (n, j) , идентичен каналу, определяемому парой $(m_{n,j}, k)$, если $m_{m_{n,j},k} = n$. Идентифицировать канал будем так же по его двум узлам (n, m) , в этом случае идентификация однозначна, будем записывать подобный индекс в скобках, а индекс по узлу и номеру связи — без скобок.

Для описания геометрии сетевой модели вводим следующие обозначения:

- $\mathbf{x}_n = \{x_{n,1}, x_{n,2}, x_{n,3}\}$ — координата узла n относительно заданной фиксированной системы отсчета;
- R_n — характерный радиус (полуширина) внутреннего узла n . Рассматривая модель с внутренними узлами в виде куба, имеем объем узла $V_n = 8R_n^3$;
- $r_{n,m}$ — полуширина канала между узлами n, m . В основных расчетах будем считать, что каналы имеют квадратное сечение. Тогда $r_{n,m}$ — половина длины стороны квадратного сечения канала.

Длина канала определяется координатами узлов, но вследствие того, что на внутреннем узле имеет место расширение хотя бы из-за подхода нескольких каналов, важным параметром является именно эффективная (для определения сопротивления) длина $L_{n,m}^{eff}$, меньшая, чем расстояние между центрами узлов $L_{n,m}$. На ее основе строится градиент давления вдоль канала, по которому и определяется поток на основе теории ползущего течения.

Эффективная длина каналов зависит как от координат узлов, так и от геометрических параметров узлов и канала:

$$L_{n,m_{n,j}}^{eff} = L_{n,m_{n,j}} - \bar{E}_n R_n F\left(\frac{R_n}{r_{n,m_{n,j}}}\right) - \bar{E}_m R_m F\left(\frac{R_{m_{n,j}}}{r_{n,m}}\right) \quad (1)$$

$$L_{n,m_{n,j}} = |\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{m_{n,j}}| = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (x_{n,j} - x_{m_{n,j},j})^2}, \quad \bar{E}_n = \begin{cases} 1, n \notin E; \\ 0, n \in E. \end{cases}$$

где $q_{n,m_{n,j}}$ — объемный расход в узле n в направлении соседнего узла $m_{n,j}$.

Здесь $F(x)$ — функция, которая ранее была откалибрована на простой модели каналов с расширением (по Оуэну) посредством сравнения с результатами расчета модели Стокса [14]:

$$F(x) = 0.65x^{0.2}.$$

Учет влияния узлов имеет место, если узел внутренний, поскольку у внешних узлов нет расширения канала и подхода прочих каналов, что и отражено в формуле (1).

Объем жидкости (часть объема канальной модели), соответствующий узлу, сводится не только к расширению узла, но и к каналам, примыкающим к нему, причем внешним узлам никакой объем не соответствует, эти узлы рассматриваются лишь как контрольные точки. Для внутреннего узла можно определить объем следующим образом:

$$V_n = 8R_n^3 + \sum_{j=1}^{J_n} r_{n,j}^2 \begin{cases} (L_{n,m_{n,j}} - R_n - R_{m_{n,j}}) / 2, & m_{n,j} \notin E; \\ L_{n,m_{n,j}} - R_n, & m_{n,j} \in E. \end{cases} \quad (2)$$

То есть к расширению внутреннего узла добавляется половина объема каналов, соединяющих его с другими внутренними узлами, и полный объем каналов, соединяющих с внешними узлами.

Для симуляции течений мы будем использовать принцип моделей Фэтта, Оуэна и Кармана–Козени, где течение в капиллярах предполагалось ламинарным течением в трубке, описываемым уравнением Навье–Стокса, решение которого для данного случая:

$$q_{n,m_{n,j}} = \frac{\xi}{\mu L_{n,m_{n,j}}^{eff}} A_{n,m_{n,j}}^2 (p_n - p_m), \quad c_{n,m_{n,j}} = \frac{\xi}{\mu L_{n,m_{n,j}}^{eff}} A_{n,m_{n,j}}^2, \quad (3)$$

где ξ — форм-фактор (зависит от формы канала (для каналов квадратного сечения $\xi = 0.5632$ [14])), A_{nm} — площадь сечения канала между узлами n и m , $p_n - p_m$ — перепад давления в канале между узлами n и m .

Как можно увидеть, при $\xi = \frac{1}{8\pi}$ мы получим известный закон Хагена–Пуазейля, описывающий расход в трубе круглого сечения.

Рассмотрим применение такой модели для решения задачи о нахождении поля давления. Для нашей модели нахождение поля какой-либо величины эквивалентно поиску значения этой величины в каждом внутреннем узле модели. Учитывая, что плотность жидкости и геометрия порового пространства постоянная, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\rho_n V_n) &= \rho_n \sum_{j=1}^{J_n} q_{n,j} = \rho_n \sum_{j=1}^{J_n} c_{n,m_{n,j}} (p_n - p_{m_{n,j}}), \quad n \notin E \\ &\Rightarrow \sum_{j=1}^{J_n} c_{n,m_{n,j}} (p_n - p_{m_{n,j}}) = 0, \quad n \notin E \end{aligned} \quad (4)$$

Получаем незамкнутую систему линейных алгебраических уравнений. Дополним их соотношениями на внешних узлах — граничными условиями:

1) условие Дирихле:

$$p_n = P(x_n), \quad n \in E_G; \quad (5)$$

2) условие Неймана в общем виде:

$$\sum_{j=1}^{J_n} c_{n,m_{n,j}} (p_n - p_{m_{n,j}}) = Q(x_n), \quad n \in E_G. \quad (6)$$

Решение дополненной системы и будет решением задачи об определении поля давлений.

Для моделирования используется сфабрикованный образец, который строится следующим образом:

1) создается равномерная сетка пор и каналов:

- а) зона образца, имеющая форму параллелепипеда, разбивается равномерной кубической сеткой;
- б) каждый из узлов полученной сетки считаем центром узла сетевой модели;
- с) каждому из полученных узлов присваиваются одинаковые радиусы, исключаяющие пересечение узлов;

- d) для каждого из узлов определяются соседние узлы: для каждого узла сетки узлы, которые имеют общее ребро с прилегающими кубическими элементами, считаются соседними (6-связность);
 - e) соседние узлы соединяются каналами с одинаковыми геометрическими параметрами;
 - f) из каждого узла на границе образца перпендикулярно образцу откладывается канал, который соединяется с «внешним» узлом — областью задания граничных условий для образца;
- 2) в равномерной сетке случайным образом создаются нерегулярности:
- a) внутренние узлы случайным образом смещаются, меняя положения объема, а также длины каналов (движение исключается пересечением узлов);
 - b) радиус случайно выбранных каналов уменьшается до малой величины, симулируя закрытые поры.

Таким образом, для вычисления течений в образце требуется задать граничные условия (для чего используются внешние узлы) и начальные условия в каждом из узлов.

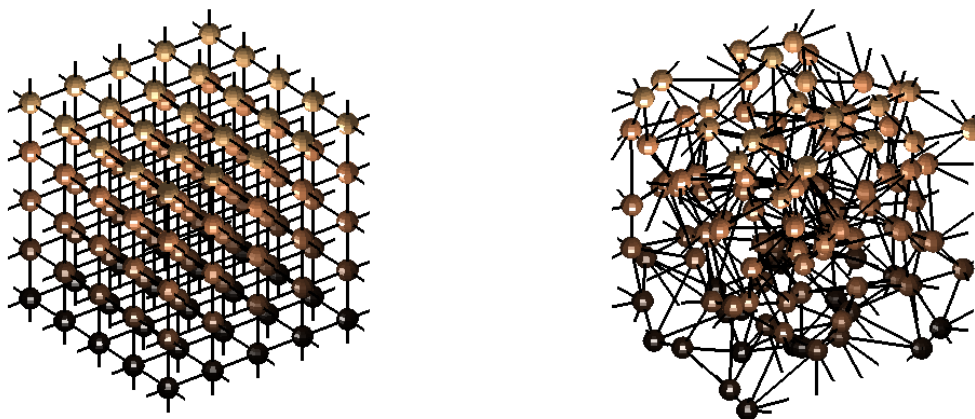


Рис. 1. Пример сгенерированного образца: слева — регулярная сетка, до преобразования (этап 1), справа — нерегулярная сетка, после преобразования (этап 2)

Моделирование псевдослучайного распределения производится посредством метода Бокса–Мюллера, позволяющего симулировать распределение Гаусса. Таким образом, для каждого из экспериментов имеем модель, которая определяется параметром среднеквадратичного отклонения σ . При $\sigma=0$ имеем случай равномерной решетки.

Решение задачи вычисления поля давления

Введем некоторые новые обозначения, которые позволят визуализировать результаты проведенных расчетов. Введем декартову систему координат с осями, параллельными связям ионной решетки, имеющую начало в углу образца. Теперь мы построим плоскость, проходящую через центр какого-либо узла модели и перпендикулярную одной из осей координат (значение координаты на этой оси в каждой точке плоскости назовем «осевой координатой», а саму ось — «основной»), и будем в качестве основных характеристик модели использовать средние значения давления и насыщенности первой жидкости в узлах на таких поверхностях. Такую поверхность будем называть средней, а ее координату обозначим L_{avg} . Среднее давление на этой поверхности обозначим P_{avg} . Насыщенность вытесняющей жидкости на этой поверхности обозначим S_{avg} .

По умолчанию при моделировании использовались следующие параметры (основная ось — ось 1) (табл.).

В каждом из экспериментов начальное давление в узлах задается как равномерно убывающее, начиная от значения давления на поверхности вытеснения и заканчивая значением на поверхности вытекания жидкости из образца.

В эксперименте проанализируем возможные изменения параметров процесса фильтрации при изменении исходной модели (ионной решетки) способом смещения узлов модели. Будем сравнивать поведение модели при двух значениях σ : $\sigma = 0$ и $\sigma = 1$. Будем определять время процесса по количе-

Таблица

Параметры моделирования

Геометрия модели	
Размеры моделируемого образца, по каждому измерению, м	0.02x0.005x0.005
Размеры модели, количество внутренних узлов по каждому измерению	200x50x50
Полуширина канала (половина стороны квадрата), м	5.0e-006
Половина характерного размера узла (половина длины стороны куба), м	5.0e-006
Параметры жидкости	
Вязкость первой жидкости, вытесняющей, Ст	0.001
Вязкость второй жидкости, вытесняемой, Ст	0.1
Перепад давления, давление на поверхности вытеснения, Па	1.0e+005
Значение давление на поверхности высачивания, Па	1.0e+002

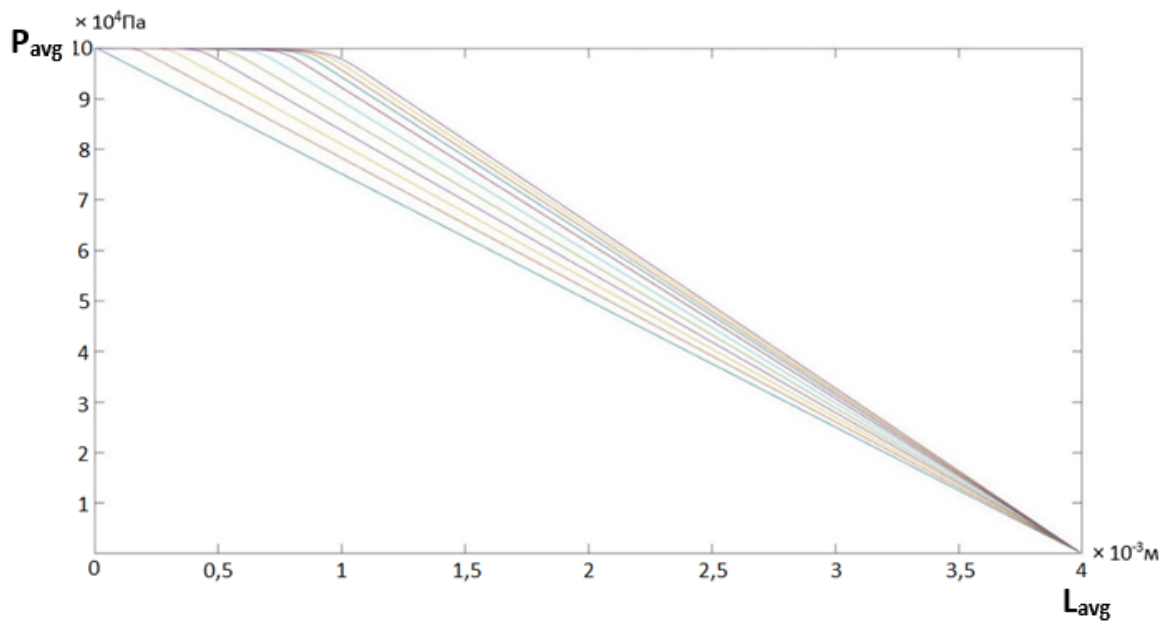


Рис. 2. Зависимость среднего давления на контрольных поверхностях от осевой координаты в образце, созданном при $\sigma = 0$. На горизонтальной оси приведены координаты средней поверхности L_{avg} (м), на вертикальной оси — среднее по поверхности давление P_{avg} (Па)

ству пройденных шагов по времени. В данном эксперименте совершаются два расчета с $dsteps=100$. В визуализации отображается распределение давления в модели каждые 10 итераций.

Обратимся к графикам давления 2 и 4. Как было ранее указано, единственная возможность изменения параметров жидкости во внутренних узлах сетевой модели — это появление потока жидкости из соседних узлов. Вследствие перепада давления жидкости начинают двигаться от поверхности вытеснения в сторону поверхности вытекания жидкости. Как можно видеть, процесс вытеснения жидкости во втором случае ($\sigma = 1$) происходит значительно медленнее, чем в первом. Такие изменения структуры уменьшили показатель проницаемости образца.

Обратимся к графикам 3 и 5. Помимо указанных выше фактов, стоит заметить, что распределение давления меняется значительно активнее, чем движение вытесняющей жидкости внутрь образца. Таким образом, давление вытесняемой жидкости растет, и она начинает двигаться в сторону поверхности вытекания жидкости.

Как можно видеть из полученных результатов, задание модели через изменение ионной решетки позволяет симулировать сложную геометрию пор.

В каждом из случаев $t \approx 15$ часов (время моделирования) и $C=0.5$ (аналог числа Куранта).

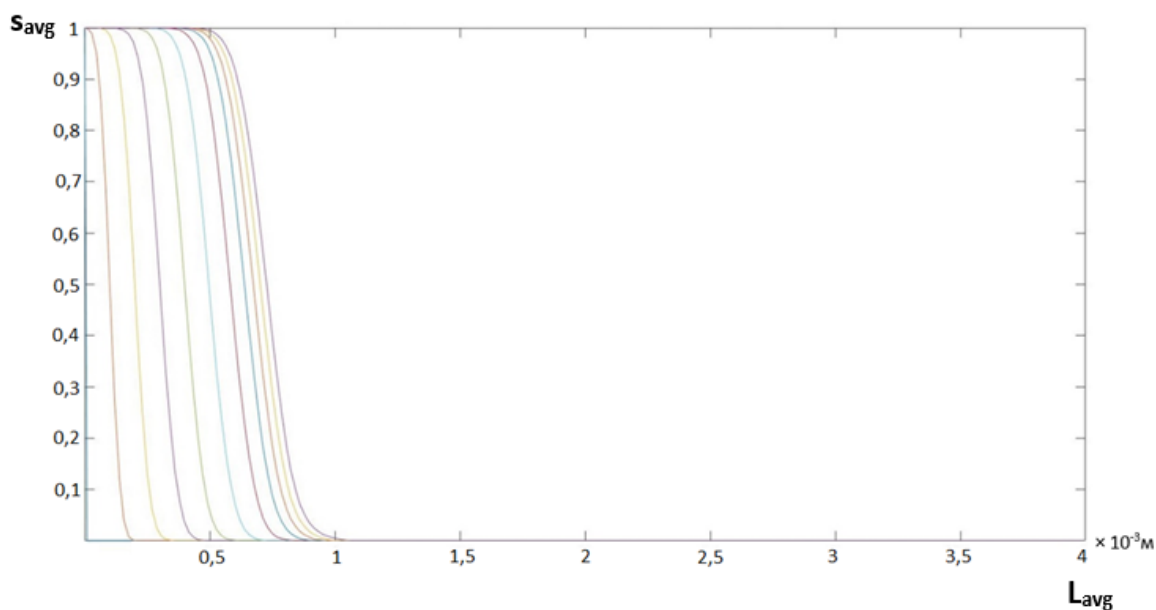


Рис. 3. Зависимость средней насыщенности вытесняющей (первой) жидкости на контрольных поверхностях от осевой координаты в образце, созданном при $\sigma = 0$. На горизонтальной оси приведены координаты средней поверхности L_{avg} (м), на вертикальной оси — средняя по поверхности насыщенность S_{avg} (безразмерная величина)

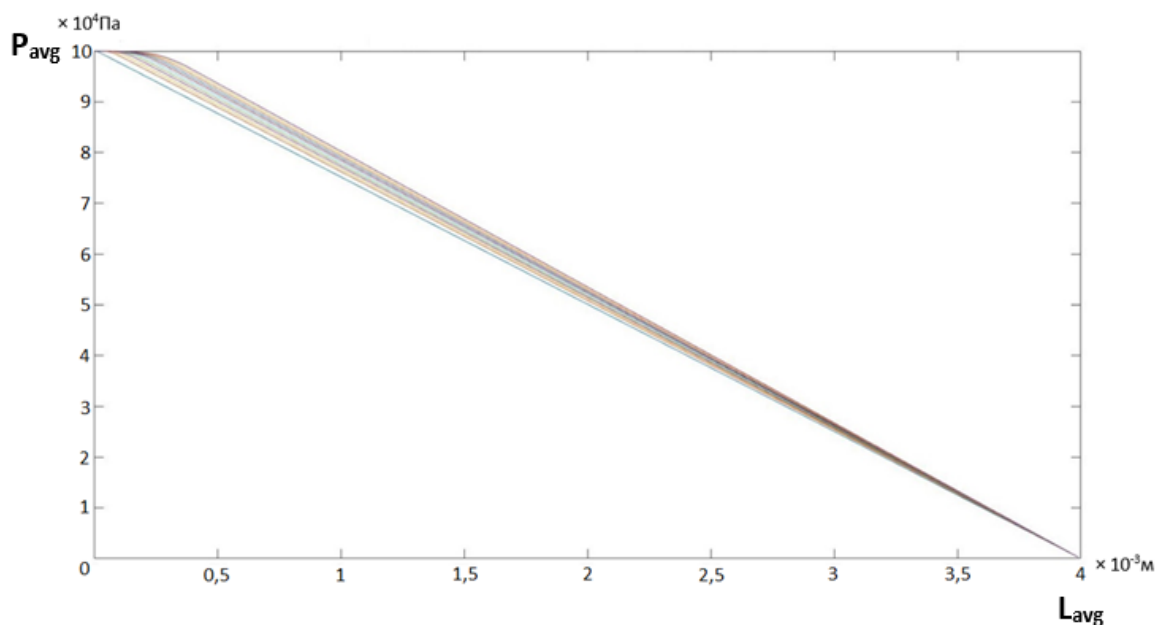


Рис. 4. Зависимость среднего давления на контрольных поверхностях от осевой координаты в образце, созданном при $\sigma = 1$. На горизонтальной оси приведены координаты средней поверхности L_{avg} (м), на вертикальной оси — среднее по поверхности давление P_{avg} (Па)

Закключение

В данной работе дан краткий обзор существующих моделей пористой среды, включая сетевые модели. Предложен новый способ построения фиктивного порового пространства на основе сетевой модели пористой среды, сформулирована математическая модель течения в данной среде.

На примере задачи определения поля давлений и концентраций жидкости при вытеснении из пористой среды продемонстрирована возможность данного способа построения фиктивного порового пространства симулировать пористые среды разных проницаемостей.

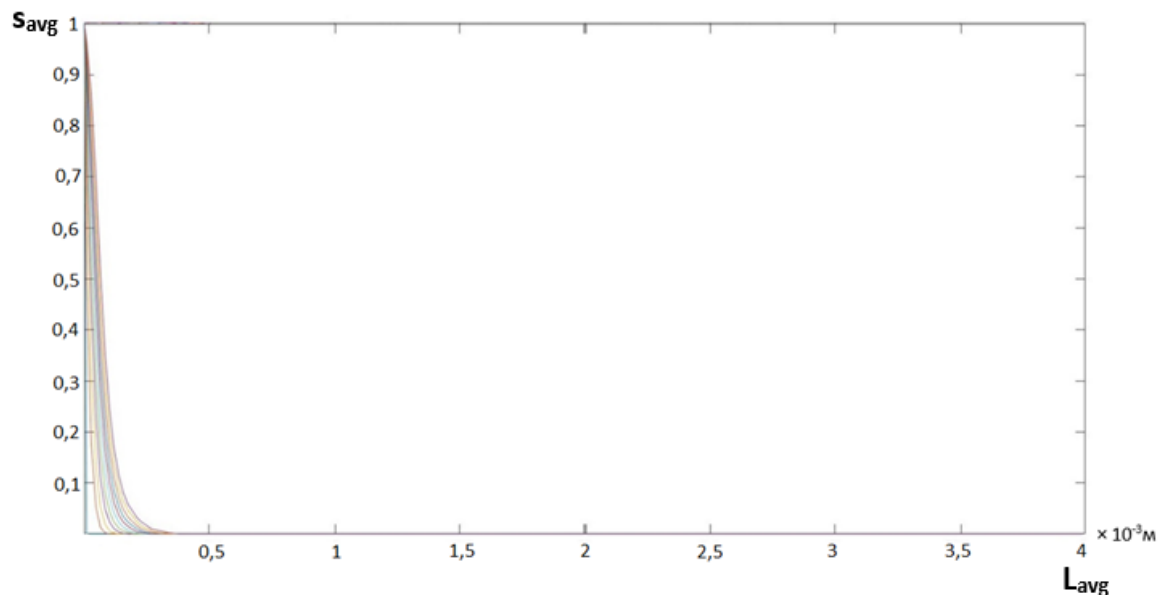


Рис. 5. Зависимость средней насыщенности вытесняющей (первой) жидкости на контрольных поверхностях от осевой координаты в образце, созданном при $\sigma = 1$. На горизонтальной оси приведены координаты средней поверхности L_{avg} (м), на вертикальной оси — средняя по поверхности насыщенность S_{avg} (безразмерная величина)

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольпин С. Г., Ломакина О. В., Афанаскин И. В., Юдин В. А. Обоснование гидродинамической модели пласта-коллектора баженовской свиты. *Успехи кибернетики*. 2021;2(4):78–86.
2. Душин В. Р., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Макеева М. Н., Манахова А. Н. Моделирование вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом химических взаимодействий между фазами. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):20–27.
3. Смирнов Н. Н., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Вайсман Ю. Г. Многократная пропитка пористой среды в условиях микрогравитации: экспериментальные исследования и математическое моделирование. *Успехи кибернетики*. 2022;3(2):24–30.
4. Смирнов Н. Н., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Фахретдинова Р. Р. Вычислительное моделирование процесса очистки трещины ГРП и процесса вытеснения нефти из области, содержащей трещину ГРП. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):14–21.
5. Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Манахова А. Н. Учет неустойчивости фронта течения жидкости сквозь пористую среду в условиях пониженной гравитации и при наличии химических взаимодействий между фазами. *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):72–85.
6. Паремская Л. А. Образование «вязких пальцев» на межфазных границах при совместном вытеснении трех вязких жидкостей из пористой среды. *Успехи кибернетики*. 2023;4(4):22–31.
7. Hazen A. Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration. 24th Annual Report. *Massachusetts State Board of Health*. USA; 1892. P. 539–556.
8. Slichter C. S. Theoretical Investigation of the Motion of Groundwaters. *USGS Annual Report*. 1899;19(Part II):295–384.
9. Kozeny J. Ueber Kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Akad. Wiss. Wien*; 1927;136(2a):271–306.
10. Carman P. C. Fluid Flow through Granular Beds. *J Soc Chem Ind*. 1938;57:225.
11. Childs E., Collis-George C. N. Interaction of Water and Porous Materials. Soil Geometry and Soil-Water Equilibria. *Discussions of the Faraday*. 1948;3:78–85.
12. Gates J. I., Tempelaar Lietz W. *API Drill. & Prod. Prac*. New York; 1950.
13. Fatt I. The Network Model of Porous Media. *Trans. AIME*. 1956;207:144.
14. Бетелин В. Б., Никитин В. Ф., Смирнов Н. Н. Сетевая модель пор. *Вестник кибернетики*. 2017;4:19–30.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ
ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ****Е. В. Страшнов^а, И. Н. Мироненко^б***Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru^б mironenko_in@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается задача имитационного моделирования инерциальных и магнитных датчиков в системах виртуального окружения. Для решения этой задачи представлены математические модели расчета показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра с учетом их реальных параметров, влияния температуры, перекрестных связей и наличия шумов. Предлагается подход, в котором показания датчиков используются для вычисления углов Эйлера, задающих ориентацию объекта. При реализации разработанного подхода была задействована калибровка показаний акселерометра и гироскопа для уменьшения влияния ошибки дрейфа нуля. Вычисление углов Эйлера проводилось путем интегрирования значений гироскопа, а также на основе полученных соотношений относительно данных акселерометра и магнитометра. При этом для ликвидации накопления ошибки интегрирования вследствие наличия шумов датчиков был реализован комплементарный фильтр, в котором вычисленные углы смешиваются в заданной пропорции. Апробация предлагаемых методов и подходов была проведена в созданном нами комплексе виртуального окружения на примере моделирования движения виртуальных моделей квадрокоптера и вертолета соосной схемы. Результаты апробации показали адекватность предлагаемых в статье решений и их применимость при реализации современных видеотренажеров, предназначенных для обучения операторов навыкам управления беспилотными летательными аппаратами.

Ключевые слова: имитационное моделирование, инерциальный датчик, углы Эйлера, калибровка, комплементарный фильтр, беспилотный летательный аппарат, система виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Для цитирования: Страшнов Е. В., Мироненко И. Н. Имитационное моделирование инерциальных датчиков в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03.

*Поступила в редакцию: 24.01.2024.**В окончательном варианте: 28.02.2024.***SIMULATION OF INERTIAL SENSORS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS****E. V. Strashnov^а, I. N. Mironenko^б***Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru^б mironenko_in@mail.ru

Abstract: this study deals with the simulation of inertial and magnetic sensors in virtual environment systems. We proposed a mathematical model for the correction of accelerometer, gyroscope, and magnetometer readings to account for the effects of temperature, cross-coupling, and noise. We also proposed using the sensor readings to compute the Euler angles that define the vehicle’s orientation. We calibrated the accelerometer and gyroscope readings to reduce the zero drift error. The Euler angles were derived by integrating the gyroscope readings and using the found relationships between the accelerometer and magnetometer readings. To eliminate the cumulative integration error caused by sensor noise, we implemented a complementary filter. It mixes the angles in a given ratio. We tested these approaches in a virtual environment with a virtual quadcopter and a coaxial-rotor helicopter. The results were promising and can be used in advanced simulators designed to train UAV operators.

Keywords: simulation, inertial sensor, Euler angles, calibration, complementary filter, unmanned aerial vehicle, virtual environment system.

Acknowledgements: this study is supported by the government contract No. FNEF-2024-0002 Simulation of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environment Systems granted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences.

Cite this article: Strashnov E. V., Mironenko I. N. Simulation of Inertial Sensors in Virtual Environments. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):24–33. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-03.

Original article submitted: 24.01.2024.

Revision submitted: 28.02.2024.

Введение

В последние годы с развитием электроники широкое распространение получили микроэлектромеханические (МЭМС) инерциальные и магнитные датчики — устройства, позволяющие определить изменение положения тела в пространстве путем измерения его ускорения и угловой скорости, а также характеристик магнитного поля. Особенность таких датчиков заключается в том, что они являются миниатюрными и располагаются на общей кремниевой подложке микросхемы [1]. Их применение охватывает широкий спектр областей, включая авиацию, промышленность, транспорт, робототехнику, виртуальную реальность и т. д. Современные мобильные телефоны, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), устройства трекинга уже невозможно представить без таких датчиков. В области виртуальной реальности активно применяются устройства, такие как гарнитура [2], контроллеры и трекары, позволяющие повысить уровень погружения человека в виртуальное пространство. На мобильные телефоны устанавливаются приложения, которые отслеживают повседневный график передвижения человека [3], включая также ситуации, когда он находится внутри помещения [4], где недоступен GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). В свою очередь, управление беспилотными транспортными средствами основано на реализации обратной связи по показаниям таких датчиков [5].

Для обучения операторов навыкам управления БПЛА в настоящее время активно создаются системы виртуального окружения и имитационно-тренажерные комплексы, в которых вместо реальных объектов используются их виртуальные аналоги. Такие системы позволяют уменьшить риск поломки реальных устройств и отработать различные нештатные ситуации, которые могут возникнуть при управлении БПЛА. При этом качество обучения в таких тренажерах непосредственно зависит от адекватности методов и алгоритмов моделирования динамики и управления БПЛА. Имитационное моделирование инерциальных датчиков в тренажерах имеет важное значение, поскольку оно позволяет повысить уровень тренировки и уменьшить вероятность возникновения ложных навыков при управлении БПЛА.

Основная проблема МЭМС датчиков заключается в том, что их измерения являются неточными из-за наличия перекрестных связей в показаниях, дрейфа нуля и шумов [6]. Кроме того, интегрирование показаний датчиков приводит к накоплению ошибок и отдалению от истинных значений. Для решения этой проблемы распространенным подходом является применение различных фильтров [7, 8] и калибровка датчиков [9, 10] перед началом работы с устройством. В данной работе представлены методы и подходы расчета показаний инерциальных и магнитных виртуальных датчиков (акселерометр, гироскоп и магнитометр) с учетом их реальных параметров, влияния температуры, перекрестных связей и наличия шумов. Предлагается подход, в рамках которого показания этих датчиков применяются для вычисления углов Эйлера ориентации виртуальных объектов. При этом обработка данных реализована с калибровкой показаний датчиков, интегрированием угловых скоростей гироскопа и применением комплементарного фильтра. Адекватность предлагаемых в статье решений была апробирована в системе виртуального окружения VirSim [11] на примере управления движением виртуальных моделей БПЛА.

Математические модели датчиков

В статье рассматриваются инерциальные датчики — акселерометр и гироскоп, а также магнитометр. Эти датчики выполняют измерения в своих локальных системах координат (ЛСК). Для определенности оси таких ЛСК будем обозначать через x , y и z . Каждый датчик характеризуется диапазоном и разрешением измерений. На показания датчиков влияет дрейф нуля, шумы и перекос осей.

Дрейф является постоянным или случайным смещением нулевого значения и в общем случае зависит от температуры окружающей среды, а также от других факторов (например, ускорение объекта и вибрации). Далее среди случайных смещений показаний мы будем рассматривать только температурное, так как остальными факторами на малом промежутке времени моделирования можно пренебречь. Шум в показаниях датчиков хорошо описывается нормальным распределением с нулевым средним, которое задается с помощью дисперсии. Также датчики подвержены перекосам осей, которые приводят к перекрестным связям в их показаниях. Рассмотрим математические модели расчета показаний этих датчиков.

Акселерометр измеряет проекцию кажущегося ускорения (разность между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением) вдоль осей своей системы координат. В общем случае акселерометр не находится в центре масс объекта. Поэтому идеальные показания акселерометра без учета ошибок вычисляются следующим образом [12]:

$$\tilde{a}' = a_l + \omega_l \times (\omega_l \times d) + \dot{\omega}_l \times d - R^T a_g, \quad (1)$$

где a_l и ω_l — линейное ускорение и угловая скорость объекта в его ЛСК; d — вектор, соединяющий центр масс объекта с центром акселерометра; R — матрица перехода из ЛСК объекта в мировую систему координат (МСК); $a_g = (0, 0, -g)^T$, g — ускорение свободного падения.

Без ограничения общности будем считать, что для виртуального акселерометра его положение совпадает с центром масс объекта. Тогда будет верно, что $d \equiv 0$, а соотношение (1) преобразуется к виду:

$$\tilde{a}' = a_l - R^T a_g. \quad (2)$$

При наличии ошибок в измерениях ускорение (2) корректируется следующим образом:

$$\tilde{a} = S_a (C_a \tilde{a}' + a_{b0} + (T - T_n) a_{bT} + \eta_a), \quad (3)$$

где $C_a = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_y & \alpha_z \\ \alpha_x & 1 & \alpha_z \\ \alpha_x & \alpha_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекоса осей, α_i — коэффициенты перекрестных связей осей, a_{b0} — постоянное смещение в показаниях, a_{bT} — температурное смещение, T и T_n — текущая и номинальная температура среды, $\eta_{a,i} \sim N(0, \sigma_{a,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{a,i}^2$ — дисперсия шума вдоль осей, $S_a = \text{diag} \{s_{a,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов, $s_{a,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^a$, $s_{T,i}^a$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как у акселерометра есть диапазон и разрешение в измерениях, то на выходе датчика получим ускорение $a = (a_x, a_y, a_z)^T$, которое вычисляется как:

$$a = r_a * \text{round} \left(\frac{\tilde{a}_{lim}}{r_a} \right), \quad a_{lim,i} = \begin{cases} a_{\max,i}, & \tilde{a}_i > a_{\max,i} \\ -a_{\max,i}, & \tilde{a}_i < -a_{\max,i} \\ \tilde{a}_i, & \text{в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (4)$$

где $a_{\max,i}$ — максимальное ускорение, которое измеряет акселерометр; r_a — разрешение акселерометра.

Гироскоп измеряет угловую скорость вращения объекта вдоль осей своей системы координат. Математическая модель гироскопа описывается как:

$$\tilde{\omega} = S_\omega (C_\omega \omega_l + \omega_{b0} + (T - T_n) \omega_{bT} + \eta_\omega), \quad (5)$$

где $C_\omega = \begin{pmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ \beta_x & 1 & \beta_z \\ \beta_x & \beta_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекоса осей, β_i — коэффициенты перекрестных связей осей,

ω_{b0} — постоянное смещение в показаниях, ω_{bT} — температурное смещение, $\eta_{\omega,i} \sim N(0, \sigma_{\omega,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{\omega,i}^2$ — дисперсия шума, $S_\omega = \text{diag} \{s_{\omega,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов $s_{\omega,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^\omega$, $s_{T,i}^\omega$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как у гироскопа также есть диапазон и разрешение измерений, то на его выходе угловая скорость $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ вычисляется в виде:

$$\omega = r_\omega * \text{round} \left(\frac{\tilde{\omega}_{lim}}{r_\omega} \right), \quad \tilde{\omega}_{lim,i} = \begin{cases} \omega_{\max,i}, \tilde{\omega}_i > \omega_{\max,i} \\ -\omega_{\max,i}, \tilde{\omega}_i < -\omega_{\max,i} \\ \tilde{\omega}_i, \text{ в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (6)$$

где $\omega_{\max,i}$ — максимальная угловая скорость, которую измеряет гироскоп; r_ω — разрешение гироскопа.

Магнитометр измеряет характеристики магнитного поля Земли. В частности, индукционный магнитометр вычисляет вектор индукции магнитного поля вдоль осей своей системы координат. В общем случае на его показания влияют металлические предметы, которые находятся в непосредственной близости с датчиком. Математическая модель магнитометра задается как:

$$\tilde{m} = S_m (C_m m_l + m_{b0} + (T - T_n) m_{bT} + \eta_m), \quad (7)$$

где m_l — вектор магнитной индукции в ЛСК датчика, $C_m = \begin{pmatrix} 1 & \gamma_y & \gamma_z \\ \gamma_x & 1 & \gamma_z \\ \gamma_x & \gamma_y & 1 \end{pmatrix}$ — матрица перекося

осей, γ_i — коэффициенты перекрестных связей осей, m_{b0} — постоянное смещение в показаниях, m_{bT} — температурное смещение, $\eta_{m,i} \sim N(0, \sigma_{m,i}^2)$ — аддитивный Гауссовский шум, $\sigma_{m,i}^2$ — дисперсия шума вдоль осей, $S_m = \text{diag} \{s_{m,i}\}$ — диагональная матрица коэффициентов $s_{m,i} = 1 + (T - T_n) s_{T,i}^m$, $s_{T,i}^m$ — температурные коэффициенты масштабирования, $i \in \{x, y, z\}$.

Так как магнитометр имеет свой диапазон и разрешение измерений, то на его выходе получим вектор магнитной индукции $m = (m_x, m_y, m_z)^T$, который вычисляется как:

$$m = r_m * \text{round} \left(\frac{\tilde{m}_{lim}}{r_m} \right), \quad \tilde{m}_{lim,i} = \begin{cases} m_{\max,i}, \tilde{m}_i > m_{\max,i} \\ -m_{\max,i}, \tilde{m}_i < -m_{\max,i} \\ \tilde{m}_i, \text{ в прот. случае} \end{cases}, \quad i \in \{x, y, z\}, \quad (8)$$

где $m_{\max,i}$ — максимальное значение показаний магнитометра; r_m — разрешение магнитометра.

Соотношения (2)–(8) представляют собой математические модели расчета показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра. Далее рассмотрим практическую задачу, в которой показания датчиков применяются для вычисления углов ориентации объекта.

Вычисление углов ориентации объекта на основе показаний датчиков

Рассмотрим две системы координат: неподвижная МСК $OXYZ$ и ЛСК $Cxyz$, жестко связанная с подвижным объектом. При этом точка C является центром масс объекта. В качестве допущения будем считать, что направления осей ЛСК объекта совпадают с направлениями осей виртуальных датчиков. Пусть ориентация объекта в пространстве задается с помощью углов Эйлера с последовательностью ZYX , которая означает, что сначала выполняется поворот вокруг оси Z на угол ψ , затем вокруг оси Y на угол θ и, наконец, вокруг оси X на угол ϕ . Тогда матрица перехода R из ЛСК $Cxyz$ в МСК $OXYZ$ примет вид:

$$R = \begin{pmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\theta + c_\psi s_\theta c_\phi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\phi & -c_\psi s_\theta + s_\psi s_\theta c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где используются обозначения $c_\alpha = \cos \alpha$, $s_\alpha = \sin \alpha$, $\alpha \in \{\phi, \theta, \psi\}$.

Связь между угловой скоростью объекта и углами Эйлера задается с помощью кинематических уравнений Эйлера [13, с. 122]:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega_x + \omega_y \sin \phi \tan \theta + \omega_z \cos \phi \tan \theta; \\ \dot{\theta} &= \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi; \\ \dot{\psi} &= \omega_y \sin \phi / \cos \theta + \omega_z \cos \phi / \cos \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\theta \neq \pm\pi/2$.

Покажем, как с помощью показаний акселерометра, гироскопа и магнитометра вычислить углы Эйлера, которые задают ориентацию объекта. Перед использованием этих показаний необходимо выполнить калибровку для заранее известного состояния объекта. Нами рассматривается подход, в

котором калибровка датчиков проводится вначале, когда объект неподвижен и углы Эйлера известны (например, $\phi = \theta = \psi = 0$). Тогда, согласно формуле (2), в идеальном случае акселерометр должен выдавать ускорение $\tilde{a}' = (0, 0, g)^T$, а гироскоп — нулевую угловую скорость $\tilde{\omega}' = (0, 0, 0)^T$. Суть калибровки акселерометра и гироскопа состоит в расчете векторов $\Delta\tilde{a}$ и $\Delta\tilde{\omega}$ отклонений показаний датчиков от истинных значений. Для этого рассматриваются выборки из N значений показаний датчиков, по среднему арифметическому которых вычисляются искомые векторы:

$$\Delta\tilde{a} = \sum_{k=1}^N a^{(k)}/N - \tilde{a}', \quad \Delta\tilde{\omega} = \sum_{k=1}^N \omega^{(k)}/N. \quad (11)$$

Тогда показания акселерометра и гироскопа в процессе моделирования корректируются следующим образом:

$$\hat{a} = g \frac{a - \Delta\tilde{a}}{\|a - \Delta\tilde{a}\|}, \quad \hat{\omega} = \omega - \Delta\tilde{\omega}. \quad (12)$$

Калибровка магнитометра в данной статье не рассматривается, так как она предполагает предварительное выполнение вращений объекта вокруг своих осей с целью обнаружения магнитных полей, создаваемых ферромагнетиками [3, с. 17].

Откалиброванные показания гироскопа (12) используются для вычисления углов Эйлера путем интегрирования уравнений (10) по явной схеме:

$$\begin{aligned} \phi_g &= \phi(t) + \Delta t (\hat{\omega}_x(t) + \hat{\omega}_y(t) \sin \phi(t) \tan \theta(t) + \hat{\omega}_z(t) \cos \phi(t) \tan \theta(t)); \\ \theta_g &= \theta(t) + \Delta t (\hat{\omega}_y(t) \cos \phi(t) - \hat{\omega}_z(t) \sin \phi(t)); \\ \psi_g &= \psi(t) + \Delta t (\hat{\omega}_y(t) \sin \phi(t) / \cos \theta(t) + \hat{\omega}_z(t) \cos \phi(t) / \cos \theta(t)), \end{aligned} \quad (13)$$

где Δt — шаг моделирования; $\phi(0) = \phi_0$, $\theta(0) = \theta_0$, $\psi(0) = \psi_0$ (в частности, $\phi_0 = \theta_0 = \psi_0 = 0$).

Однако из-за шумов в показаниях гироскопа с течением времени будет накапливаться ошибка интегрирования, которая приведет к сильному различию с истинными значениями. Для уменьшения влияния этой ошибки необходимо корректировать углы Эйлера, вычисленные по формуле (13). Для этой цели используются показания акселерометра и магнитометра.

Основная идея использования акселерометра заключается в том, что в отсутствии ускорения объекта его показания в МСК должны быть равны гравитационному ускорению, то есть $\hat{a}^w = R\hat{a} = (0, 0, g)^T$. Если умножить $\hat{a}^w$ на матрицу R^T с учетом (9), то получим следующие уравнения:

$$\hat{a}_x = -g \sin \theta; \quad \hat{a}_y = g \sin \phi \cos \theta; \quad \hat{a}_z = g \cos \phi \cos \theta.$$

Отсюда также верно, что $\sqrt{\hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2} = g |\cos \theta|$.

Тогда углы Эйлера при $|\theta| < \pi/2$ вычисляются следующим образом:

$$\phi_a = \arctan \frac{\hat{a}_y}{\hat{a}_z}, \quad \theta_a = \arctan \frac{-\hat{a}_x}{\operatorname{sgn} \hat{a}_z \sqrt{\hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2}}. \quad (14)$$

Уравнения (14) позволяют вычислить только углы ϕ и θ . Для вычисления недостающего угла ψ используются показания магнитометра. Идея заключается в том, что вектор магнитной индукции Земли должен оставаться неизменным в МСК, то есть $m^w = Rm = (m_x^w, m_y^w, m_z^w)^T$, где $m_x^w = \text{const} \neq 0$, $m_y^w = \text{const} \neq 0$ и $m_z^w = \text{const}$. Тогда, если умножить вектор m^w на матрицу R^T из (9), то получим соотношения в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_x &= c_\theta(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) - s_\theta m_z^w; \\ m_y &= c_\phi(-s_\psi m_x^w + c_\psi m_y^w) + s_\theta s_\phi(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) + c_\theta s_\phi m_z^w; \\ m_z &= s_\phi(s_\psi m_x^w - c_\psi m_y^w) + s_\theta c_\phi(c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w) + c_\theta c_\phi m_z^w. \end{aligned}$$

Преобразуем эти уравнения следующим образом. Умножим третье уравнение на s_ϕ и вычтем из второго уравнения, умноженного на c_ϕ , а также умножим первое уравнение на c_θ , второе — на $s_\theta s_\phi$, третье — на $s_\theta c_\phi$ и суммируем полученный результат. В итоге получим:

$$m_z s_\phi - m_y c_\phi = s_\psi m_x^w - c_\psi m_y^w = \sqrt{(m_x^w)^2 + (m_y^w)^2} \sin(\psi - \delta);$$

$$m_x c_\theta + m_y s_\theta s_\phi + m_z s_\theta c_\phi = c_\psi m_x^w + s_\psi m_y^w = \sqrt{(m_x^w)^2 + (m_y^w)^2} \cos(\psi - \delta),$$

где угол $\delta = \arctan(m_y^w/m_x^w)$ определяется в начале моделирования.

Отсюда будет верно, что:

$$\psi_m = \arctan \frac{m_z s_\phi - m_y c_\phi}{m_x c_\theta + m_y s_\theta s_\phi + m_z s_\theta c_\phi} + \delta. \quad (15)$$

В итоге мы получили соотношения (13)–(15), позволяющие вычислить углы Эйлера на основе показаний гироскопа, акселерометра и магнитометра. Для применения полученных результатов воспользуемся комплементарными фильтрами, которые смешивают показания датчиков в заданной пропорции:

$$\begin{aligned} \phi(t + \Delta t) &= (1 - w)\phi_g + w\phi_a; \\ \theta(t + \Delta t) &= (1 - w)\theta_g + w\theta_a; \\ \psi(t + \Delta t) &= (1 - w)\psi_g + w\psi_m, \end{aligned} \quad (16)$$

где w — весовой коэффициент.

Идея комплементарного фильтра (16) заключается в том, что, выбирая небольшие значения весового коэффициента w , можно скорректировать результаты, полученные путем интегрирования угловых скоростей по формуле (13). При этом ускорение объекта и ошибки в показаниях магнитометра из-за наличия ферромагнетиков не будут сильно отклонять углы Эйлера от истинных значений. В дальнейшем вычисленные углы Эйлера используются для управления и стабилизации БПЛА в системе виртуального окружения.

Результаты моделирования

Предложенные в статье методы и подходы имитационного моделирования инерциальных датчиков были реализованы в комплексе виртуального окружения VirSim [11]. В рамках этого комплекса виртуальные модели сцен и роботов создаются в системе компьютерного моделирования 3ds Max из набора геометрических примитивов и других объектов. Созданные виртуальные модели экспортируются в специальном формате для последующего чтения данных в VirSim перед началом моделирования. Кроме того, был разработан редактор для создания функциональных схем, которые описывают логику управления объектами и состоят из набора блоков, соединенных друг с другом линиями. Программный комплекс VirSim состоит из трех подсистем: динамики, управления и визуализации. Цикл моделирования в этом комплексе следующий. Сначала в подсистеме управления выполняется расчет функциональных схем с передачей полученного результата в другие подсистемы. Затем в подсистеме динамики вычисляются новые координаты объектов на основе их математических моделей. Эти координаты передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет рендеринг виртуальной сцены в масштабе реального времени. Обратная связь в VirSim реализована посредством передачи данных из подсистемы динамики в подсистему управления.

Для реализации инерциальных датчиков в системе 3ds Max был разработан плагин с целью их создания, задания параметров и экспортирования в VirSim. На рис. 1 показан пример создания акселерометра для виртуальной модели квадрокоптера. Для этого необходимо выбрать датчик на панели инструментов, задать для него параметры и привязать к общему узлу в модели квадрокоптера. Математические модели (2)–(8) расчета показаний виртуальных датчиков были реализованы в подсистеме динамики в виде программных модулей. При этом глобальные параметры сцены, такие как температура окружающей среды и вектор индукции магнитного поля, задаются в текстовом конфигурационном файле, чтение которого выполняется перед началом моделирования.

Вычисление углов Эйлера на основе показаний датчиков было реализовано в подсистеме управления. На рис. 2 показан фрагмент функциональной схемы управления виртуальной моделью БПЛА. В

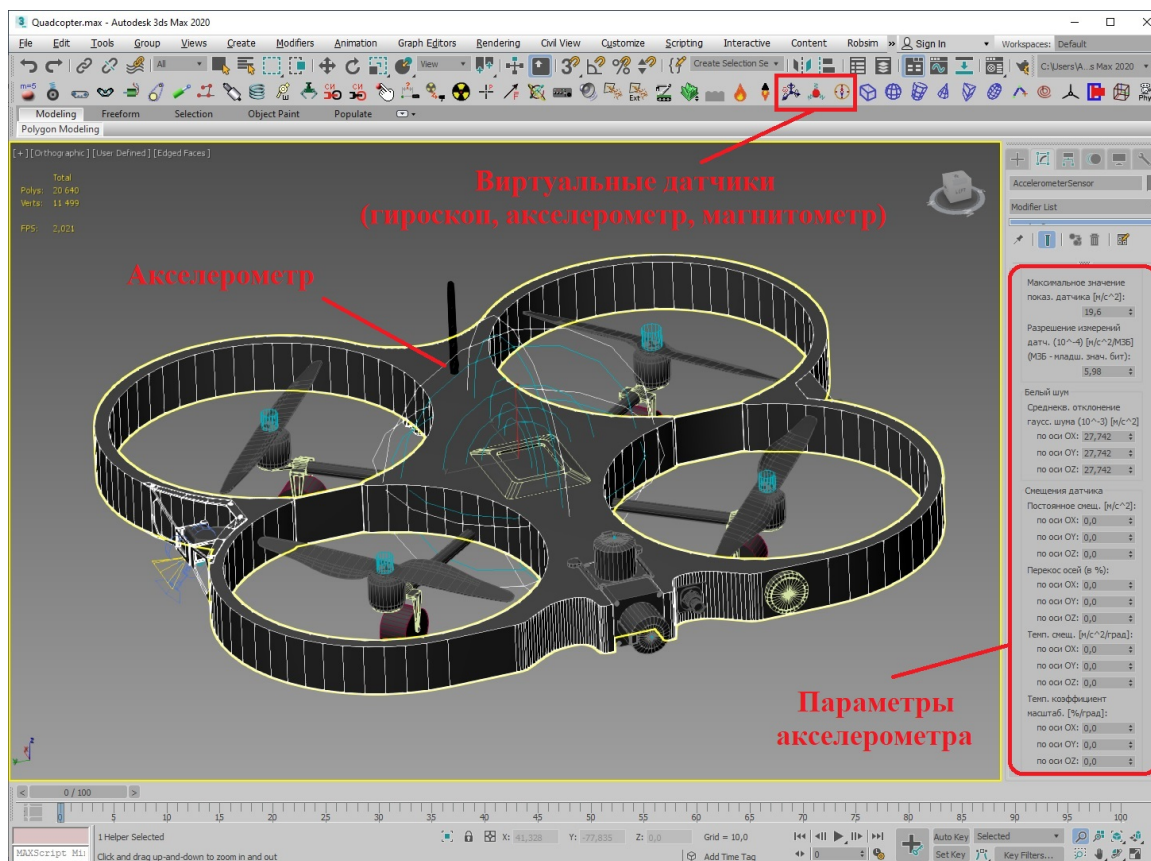


Рис. 1. Создание инерциальных датчиков в системе 3ds Max

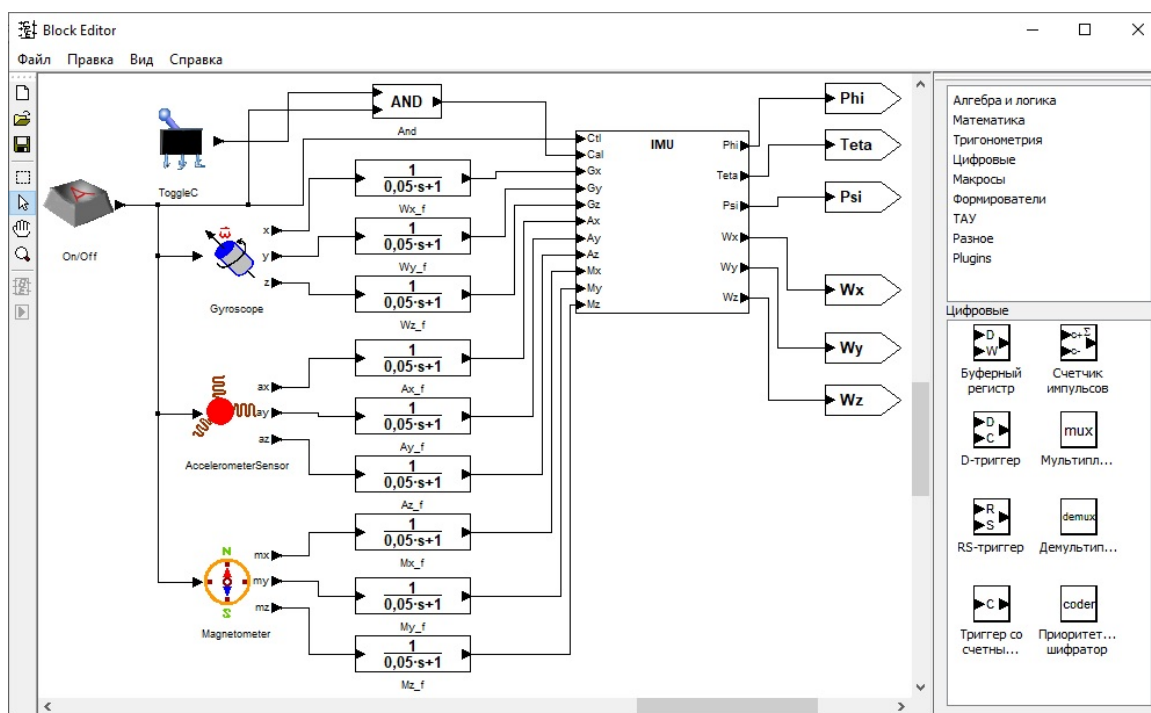


Рис. 2. Функциональная схема управления

ней входами являются управляющие сигналы пульта (кнопка включения и тумблер запуска калибровки). При этом инерциальные датчики реализованы в виде блоков, которые вычисляют свои значения, если поступает единичный сигнал от пульта на их входы. Для уменьшения влияния шумов в показаниях датчиков в схеме были добавлены фильтры нижних частот первого порядка с постоянной времени

$\tau = 0.05$ с. Отфильтрованные значения датчиков поступают на входы разработанного плагин-блока с именем IMU (Inertial Measurement Unit), который вычисляет углы Эйлера, согласно соотношениям (11)–(16) с весовым коэффициентом $w = 0.02$. Вычисленные углы в функциональной схеме затем используются для управления горизонтальным движением и стабилизации БПЛА.

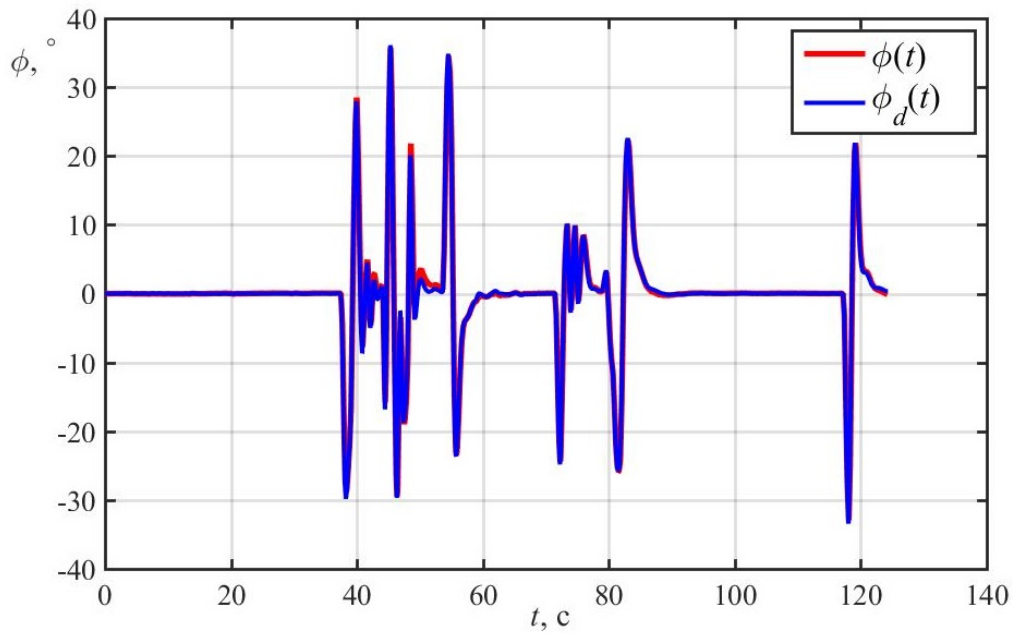


Рис. 3. График изменения угла тангажа БПЛА

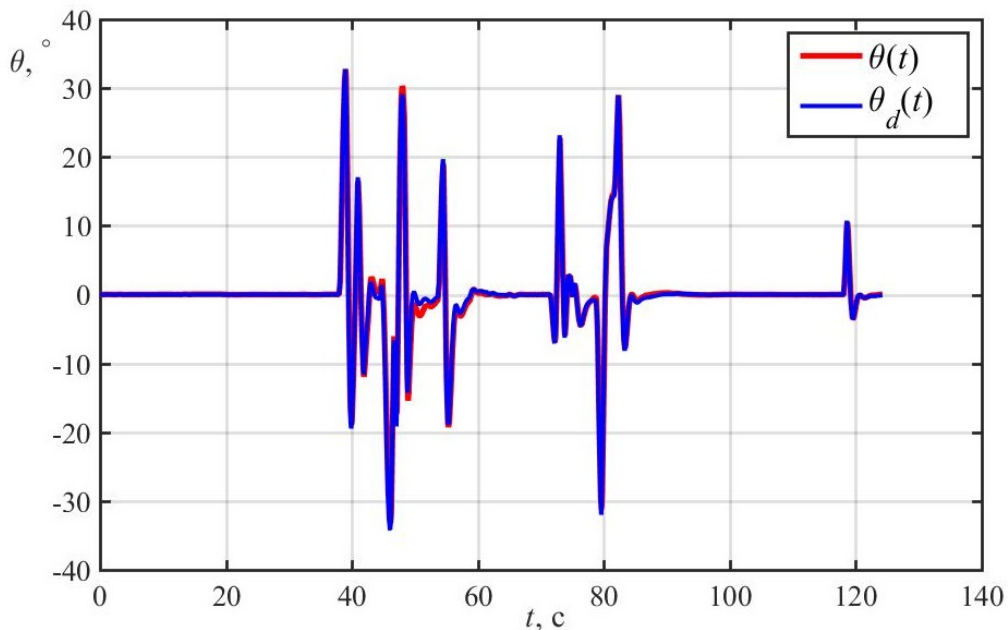


Рис. 4. График изменения угла крена БПЛА

Апробация предлагаемых в статье решений была проведена в VirSim на примере моделирования движения БПЛА (квадрокоптера) с виртуальными датчиками, параметры которых были взяты из [3, с. 14], [14], [15] и [16]. Для калибровки датчиков было выбрано начальное состояние летательного аппарата, когда он располагается на ровной горизонтальной поверхности и неподвижен. Управление движением квадрокоптера реализовано с помощью специального тренажерного пульта. На рисунках 3 и 4 приводятся графики зависимостей от времени вычисленных углов ϕ , θ и их эталонных (точных) углов ϕ_d , θ_d при движении БПЛА в горизонтальной плоскости. Из графиков видно, что вычисленные

углы Эйлера обладают точностью, необходимой для реализации движения БПЛА, и при этом соблюдаются переходные процессы при изменении ориентации квадрокоптера, которые характерны для реальных аппаратов. Предложенные в статье методы и подходы также были апробированы на виртуальной модели вертолета соосной схемы (см. рис. 5), предназначенного для фото и видеосъемки на Марсе. Эта модель содержит такие виртуальные датчики, как акселерометр, гироскоп и инклинометр для измерения начальной ориентации аппарата, когда он находится на поверхности Марса. Результаты апробации в VirSim показали адекватность и эффективность предложенных в статье методов и подходов.

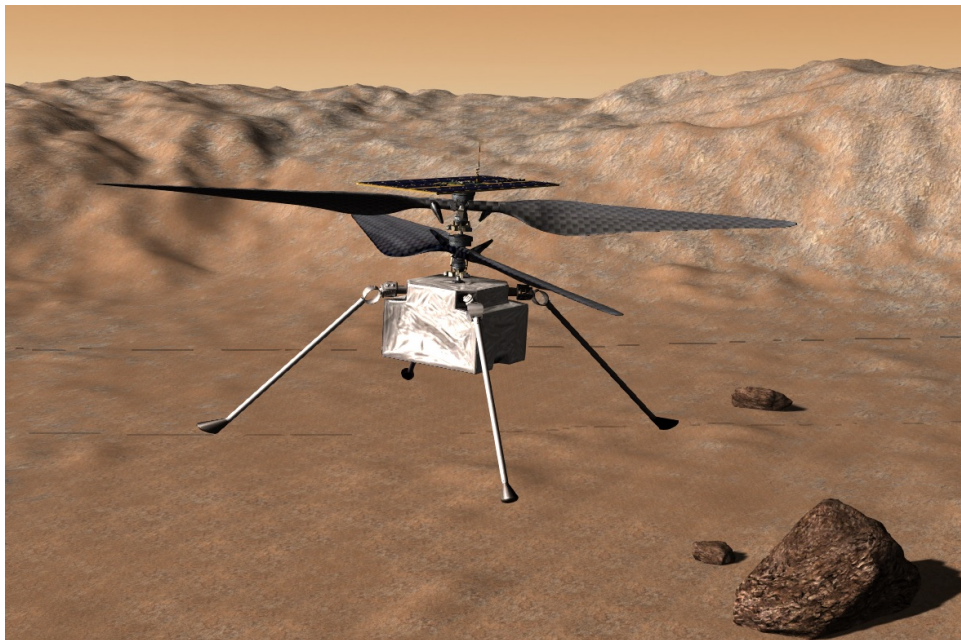


Рис. 5. Виртуальная модель марсианского вертолета соосной схемы

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы имитационного моделирования инерциальных и магнитных датчиков (акселерометр, гироскоп и магнитометр) в системах виртуального окружения. Разработан подход для вычисления углов ориентации объектов, который основан на калибровке показаний датчиков, интегрирования угловых скоростей и применении комплементарного фильтра. Предложенные в статье методы и подходы также могут быть использованы для расчета траектории движения виртуальных объектов и решения других практических задач в системах виртуального окружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А. Г. *Микроэлектромеханические системы*: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ; 2016. 171 с.
2. LaValle S., Yershova A., Katsev M., Antonov M. Head Tracking for the Oculus Rift. *Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference*. Hong Kong, China; 2014. P. 187–194. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6906608.
3. Aranburu A. *IMU Data Processing to Recognize Activities of Daily Living with Smart Headset*. University of California; 2018. 106 p.
4. Renaudin V., Combettes C. Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation. *Sensors*. 2014;14:22864–22890. DOI: 10.3390/s141222864.
5. Kok M., Hol J. D., Schon T. B. Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2017;11(1–2):1–153. DOI: 10.1561/20000000094.
6. Павлов Д. В., Лукин К. Г., Петров М. Н. Разработка имитационной модели MEMS-акселерометра в среде Simulink. *Вестник НовГУ*. 2016;4:28–33.

7. Narkhede P., Poddar S., Walambe R., Ghinea G., Kotecha K. Cascaded Complementary Filter Architecture for Sensor Fusion in Attitude Estimation. *Sensors*. 2021;21:1–18. DOI: 10.3390/s21061937.
8. Valenti R. G., Dryanovski I., Xiao J. Z. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs. *Sensors*. 2015;15(8):19302–19330. DOI: 10.3390/s150819302.
9. Pedley M. *High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer*. Freescale Semiconductor Application Note. Austin, TX, USA; 2015.
10. Roetenberg D., Luinge H. J., Baten C. T., Veltink P. H. Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil.* 2005;13:395–405. DOI: 10.1109/TNSRE.2005.847353.
11. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
12. Rogers R. M. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. AIAA Education Series; 2000.
13. Дронг В. И., Дубинин В. В., Ильин М. М. и др. *Курс теоретической механики: учебник для вузов*; под общ. ред. К. С. Колесникова. 3-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана; 2005. 736 с.
14. *Accelerometer Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/accelparams.html>.
15. *Gyroscope Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/gyroparams.html>.
16. *Magnetometer Sensor Parameters – MATLAB*. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nav/ref/magparams.html>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-04

ВОЗМОЖНОСТИ ЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА В ОЦЕНКЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА**Д. В. Горбунов^а, А. В. Гавриленко^б, А. Ю. Кухарева^с, Е. А. Манина^д***Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а *gorbunov.dv@mail.ru*^б *ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1837-5698>,  gavrilenko.anna.v@gmail.com*^с *alja.87@mail.ru*, ^д *maninaea@mail.ru*

Аннотация: использование физических методов и моделей в оценке биомеханических параметров организма человека вызывает много объективных трудностей. Мы регистрируем потерю эргодичности для любых выборок. Возникает проблема дальнейшего применения всей статистики, в частности, не изучена проблема расчета энтропии Шеннона H для оценки тремора и теппинга. В настоящем сообщении представлены данные по расчету энтропии Шеннона для тремора испытуемого, находящегося в разных физиологических состояниях (без нагрузки и при дозированной статической нагрузке). Доказано, что в этом случае возникает неопределенность 1-го типа (статистика не дает различий).

Ключевые слова: энтропия, хаос, неопределенность, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Горбунов Д. В., Гавриленко А. В., Кухарева А. Ю., Манина Е. А. Возможности энтропийного подхода в оценке биомеханических параметров человека. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):34–39. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-04.

Поступила в редакцию: 26.01.2024.

В окончательном варианте: 03.03.2024.

ENTROPY-BASED APPROACH TO ASSESSING HUMAN BIOMECHANICAL PARAMETERS**D. V. Gorbunov^a, A. V. Gavrilenko^b, A. Yu. Kukhareva^c, E. A. Manina^d***Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^а *gorbunov.dv@mail.ru*^б *ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1837-5698>,  gavrilenko.anna.v@gmail.com*^с *alja.87@mail.ru*, ^д *maninaea@mail.ru*

Abstract: the application of physical methods and models in the assessment of human biomechanical parameters is challenging. It means the loss of ergodicity for any samples. This questions any further application of all statistics, In particular, the estimation of the Shannon entropy (H) for tremor and tapping samples is not well studied. This study presents the Shannon entropy estimation results for tremor samples of a person in different physiological states (without load and under dosed static load). It is shown that type 1 uncertainty arises (statistical values are identical).

Keywords: entropy, chaos, uncertainty, Eskov-Zinchenko effect.

Cite this article: Gorbunov D. V., Gavrilenko A. V., Kukhareva A. Yu., Manina E. A. Entropy-Based Approach To Assessing Human Biomechanical Parameters. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):34–39. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-04.

Original article submitted: 26.01.2024.

Revision submitted: 03.03.2024.

Введение

Более 20 лет назад было положено начало доказательству эффекта Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) сначала в биомеханике, а затем для других параметров функций организма человека, находящегося в различных физических, психических и физиологических состояниях [1–9]. При регистрации треморограмм (ТМГ) и теппингграмм (ТПГ) в покое и при физических нагрузках у испытуемых наблюдалась потеря эргодичности любых выборок как ТМГ, так и ТПГ [1–9]. Во всех случаях эти выборки были статистически неустойчивы. Это означает, что их статистическое повторение (по разным критериям) невозможно [1–9].

В итоге был доказан ЭЕЗ, т. е. потеря эргодичности, что было обозначено как неопределенность 2-го типа (НВТ). В этом случае каждая выборка уникальна, и ее невозможно использовать для описания биомеханических систем и тем более для прогноза состояний организма человека.

Этот ЭЭЗ имеет универсальный характер, и он касается не только статистических функций $f(x)$ выборок ТМГ и ТПГ, но и их спектральных плотностей сигнала (СПС), автокорреляций (АК) и других характеристик биосистем – систем 3-го типа (СТТ), по W. Weaver [10].

Все это было обозначено как неопределенность 2-го типа, и вопрос о динамике поведения параметров энтропии остается открытым. В частности, как себя ведет энтропия Шеннона H для одного и того же испытуемого, находящегося в разных физических состояниях.

Расчет энтропии Шеннона H для одного испытуемого

Указанная выше проблема имеет два принципиальных аспекта. Во-первых, нет количественных данных о поведении энтропии H для неизменного физического, психического или физиологического состояния одного и того же испытуемого, находящегося в покое. Для решения этого аспекта проблемы мы провели большое количество повторных регистраций выборок ТМГ для одного и того же испытуемого. Регистрацию постурального тремора мы производили с помощью запатентованного тремографа на базе токовых датчиков.

В этом случае мы регистрировали положение пальца по вертикали $x(t)$ с точностью до 0,1 мм. Подчеркнем, что обычно амплитуда тремора бывает в пределах 0–5 мм, и указанная точность обеспечивает получение достаточно качественных результатов по ТМГ.

Далее аналоговый сигнал дискретизировался с частотой дискретизации $F=100$ Гц. Такая частота вполне достаточна, т. к. сам биомеханический сигнал имеет частотный диапазон $F \in (0,10)$. По теореме Котельникова, мы тем самым обеспечили довольно качественную регистрацию ТМГ.

Поскольку общее время регистрации T для ТМГ было 5 секунд, то в итоге каждая выборка ТМГ содержала не менее 500 точек (значений ТМГ). Такая выборка была вполне репрезентативна, и далее такие измерения для одного испытуемого повторялись 15 раз.

В итоге за одну серию измерений (у одного испытуемого) мы получили 15 выборок ТМГ, которые можно сравнить статистически, например, по критерию Вилкоксона. Для этого строилась матрица парных сравнений выборок ТМГ, куда заносили критерий Вилкоксона P_{ij} для i -ой и j -ой выборок.

Если критерий Вилкоксона $P_{ij} \geq 0,05$, то такая пара выборок имеет одну общую генеральную совокупность. В этом случае мы говорим о статистическом совпадении для i -ой и j -ой выборок. При $P_{ij} < 0,05$ мы имеем разные генеральные совокупности, т. е. выборки не совпадали [1–9].

В таких матрицах парных сравнений 15-ти выборок мы находили число K пар ТМГ, для которых $P_{ij} \geq 0,05$. Во всех случаях (несколько сотен таких матриц) мы имеем весьма наибольшие значения K . Обычно $K \leq 5\%$ от всех 105-ти разных пар сравнения [1–9].

Это доказывает потерю статистической устойчивости выборок ТМГ, что и подтверждает эффект Еськова–Зинченко (ЭЭЗ). Потеря эргодичности выборок ТМГ сейчас обозначается нами как неопределенность 2-го типа. Вероятность такого повтора во всех наших экспериментах составляла менее 5% (из всех 105-ти разных пар сравнения в таких матрицах).

Для примера мы представляем такую типичную матрицу парных сравнений выборок ТМГ для одного и того же человека (в его неизменном состоянии покоя). В таблице 1 число пар K весьма невелико ($K=3$), и обычно выборки не совпадают с частотой $P^* \geq 0,95$. Это доказывает невозможность использования статистического метода даже при расчетах в биомеханике [3, 4].

Подчеркнем, что ЭЭЗ доказан для многих других параметров функций организма человека (в работе сердца, мышц, работе мозга и т. д.) [11–17]. Все выборки этих параметров уникальны.

Все это имеет глобальный характер, и сейчас мы говорим о биосистемах, которые являются неэргодичными системами природы. В науке нет теории неэргодичных систем. Усилия многих ученых (включая наших выдающихся математиков В. И. Арнольда, Я. Г. Синая) не привели к ее появлению. Поэтому возникает проблема создания такой теории для всех биосистем, которая должна выйти за пределы современной науки [11–17].

Очевидно, что потеря эргодичности для биосистем означает завершение использования методов статистики в биомеханике. Она не дает прогноз будущего из-за хаотически изменяющихся статистических функций распределения $f(x)$, СПС, автокорреляций $A(t)$ и других статистических характеристик. Отдельная проблема в этой связи возникает относительно значений энтропии. Как себя ведет энтропия Шеннона H ?

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок треморограмм одного испытуемого (число повторов $N=15$), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p<0,05$, число совпадений $k=3$) [3, 4]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.02	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
5	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
6	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
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.42	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		0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	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
11	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
12	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
13	0.96	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
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
15	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	

Подчеркнем, что при неопределенности 2-го типа все статистические характеристики ($f(x)$, СПС, $A(t)$ и т. д.) непрерывно и хаотично изменяются для одного и того же испытуемого без изменений его физических, психологических или физиологических состояний.

Таблица 2

Результаты статистической обработки динамики поведения H – энтропии Шеннона для тремора одного и того же человека (число повторов $N = 15 \times 15$)

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{14}	H_{15}
1	3.322	3.322	3.122	3.122	3.322	3.322	3.122	2.646	3.322	3.122	3.322	3.322	3.322	3.122	2.922
2	3.322	3.322	3.122	3.122	2.922	2.846	3.122	3.322	3.322	2.722	3.322	3.322	2.922	3.122	3.322
3	3.122	3.122	3.122	3.322	3.122	3.122	3.122	3.322	3.122	2.846	3.122	3.122	3.122	3.122	3.122
4	3.122	2.922	3.122	3.122	3.322	3.122	3.122	3.122	3.122	2.722	3.322	3.322	3.122	3.322	2.922
5	3.322	2.922	3.122	2.922	3.122	3.122	2.646	3.122	3.322	2.922	2.922	3.122	3.322	3.122	3.322
6	2.922	3.322	3.322	3.122	3.322	2.922	3.122	3.122	3.122	3.122	3.122	3.322	3.122	3.122	3.122
7	3.322	2.922	3.322	3.322	3.122	3.122	3.322	2.922	3.322	3.122	3.122	3.122	3.122	3.122	3.322
8	3.122	3.322	3.322	2.522	3.322	3.122	2.846	3.122	3.322	2.846	3.122	3.122	3.122	2.922	3.122
9	3.322	3.122	3.122	3.322	3.322	3.322	2.922	3.122	3.322	3.322	3.122	3.322	3.122	2.846	3.322
10	2.922	2.922	3.322	2.846	3.122	3.122	3.322	3.122	3.322	3.322	2.922	3.322	2.922	3.322	3.322
11	3.322	3.322	3.322	3.322	3.322	3.122	3.122	3.322	2.846	3.322	3.322	2.922	3.322	3.322	3.322
12	2.922	3.322	3.122	3.322	3.322	3.122	3.322	3.322	2.922	3.122	3.322	3.122	3.122	2.922	3.322
13	2.846	3.322	3.122	3.322	3.122	2.922	3.322	3.322	2.846	2.922	2.846	3.322	3.122	3.122	3.322
14	3.322	3.322	3.122	3.322	3.322	3.322	3.122	2.922	3.122	3.322	3.322	2.922	3.122	3.322	2.922
15	2.922	2.846	3.122	3.122	3.322	3.322	3.122	3.122	3.322	3.122	3.122	3.322	3.322	2.922	3.322
<H>	3.143	3.157	3.189	3.143	3.228	3.130	3.112	3.130	3.178	3.058	3.157	3.202	3.149	3.117	3.202

В таблице 2 мы представляем расчет энтропии Шеннона H для 15-ти повторных регистраций выборок ТМГ. Нами было установлено, что существенных изменений H в этом случае не наблюдается. Иными словами, энтропия Шеннона H существенно не изменяется, и поэтому для нее нет неопределенности 2-го типа. Статистическая устойчивость выборок H как бы дает надежду на ее дальнейшее использование. Этого нет для $f(x)$, СПС, $A(t)$ и т. д.

Однако вся физика доказывает, что изменения физиологических состояний объекта должно приводить и к изменению энтропии H . Имеет ли это место для СТТ – биосистем?

Возникает существенный вопрос: если энтропия H не изменяется для одного испытуемого (в его неизменном состоянии), то как себя ведет H при изменении физического состояния испытуемого? Можно ли рассматривать любого человека как физическую систему?

Напомним, что вся современная биофизика базируется на этом: законы физики применимы для биосистем. Тело человека, его биомеханика, могут описываться с позиции физики. Все оказалось гораздо сложнее и непрогнозируемо. Биосистемы – это СТТ, которые могут и не выполнять законы физики.

Специфика всех биосистем – СТТ

Напомним, что еще в 1948 году W. Weaver [10] предлагал вывести все биосистемы за пределы детерминистской и стохастической науки (ДСН). Weaver предлагал создать новую, особую науку, для описания СТТ – биосистем [10]. Почему это надо сделать, Weaver не объяснил. Он не доказал особые свойства СТТ, и поэтому его игнорировали 50 лет [1–9].

После доказательства потери эргодичности для СТТ (ЭЭЗ) и потери однородности выборок групп возникает острая необходимость в разработке новой, третьей (после ДСН) науки для особых биосистем. Эта новая наука – теория хаоса-самоорганизации (ТХС) [1–9, 11–19].

Для изучения роли энтропии Шеннона в поведении биосистем мы провели серии опытов с одним и тем же испытуемым сначала в покое, а затем при статической нагрузке. Очевидно, что статическая нагрузка требует больших усилий (затраты работы A , на удержание) в данном положении (с грузом).

Многочисленные повторы регистрации выборок ТМГ без груза и с нагрузкой позволили рассчитать значение энтропии H для всех таких выборок. Такие опыты были повторены для нескольких испытуемых, и их результаты привели нас к необычному значению.

Оказалось, что выборки значений энтропии Шеннона H без нагрузки статистически существенно не отличались от выборок H для одного и того же испытуемого при статической нагрузке. С физической точки зрения это невозможная ситуация.

Таблица 3

Матрица парных сравнений выборок энтропии Шеннона H треморограмм ($N=300$), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0,05$, число совпадений $k=102$)

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅
E ₁		0.81	0.17	0.76	0.15	0.89	0.94	0.86	0.53	0.31	0.55	0.33	0.53	0.92	0.36
E ₂	0.81		0.20	0.65	0.16	0.94	0.81	0.86	0.82	0.31	0.75	0.39	0.68	0.75	0.44
E ₃	0.17	0.20		0.55	0.59	0.18	0.13	0.24	0.55	0.02	0.35	0.96	0.29	0.07	0.59
E ₄	0.76	0.65	0.55		0.27	0.81	0.74	0.83	0.82	0.29	0.91	0.44	0.75	0.8	0.55
E ₅	0.15	0.16	0.59	0.27		0.02	0.15	0.17	0.39	0.01	0.16	0.61	0.05	0.09	0.61
E ₆	0.89	0.94	0.18	0.81	0.02		0.84	0.93	0.54	0.15	0.8	0.31	0.58	0.76	0.45
E ₇	0.94	0.81	0.13	0.74	0.15	0.84		0.84	0.51	0.39	0.45	0.27	0.66	0.92	0.37
E ₈	0.86	0.86	0.24	0.83	0.17	0.93	0.84		0.64	0.37	0.83	0.28	0.8	0.78	0.21
E ₉	0.53	0.82	0.55	0.82	0.39	0.54	0.51	0.64		0.16	0.8	0.72	0.89	0.45	0.55
E ₁₀	0.31	0.31	0.02	0.29	0.01	0.15	0.39	0.37	0.16		0.17	0.13	0.13	0.37	0.09
E ₁₁	0.55	0.75	0.35	0.91	0.16	0.8	0.45	0.83	0.8	0.17		0.48	1.00	0.68	0.59
E ₁₂	0.33	0.39	0.96	0.44	0.61	0.31	0.27	0.28	0.72	0.13	0.48		0.51	0.24	0.93
E ₁₃	0.53	0.68	0.29	0.75	0.05	0.58	0.66	0.8	0.89	0.13	1.00	0.51		0.48	0.68
E ₁₄	0.92	0.75	0.07	0.8	0.09	0.76	0.92	0.78	0.45	0.37	0.68	0.24	0.48		0.35
E ₁₅	0.36	0.44	0.59	0.55	0.61	0.45	0.37	0.21	0.55	0.09	0.59	0.93	0.68	0.35	

В таблице 3 представляем один из таких результатов сравнения без нагрузки: мы имеем почти точное статистическое совпадение выборок H без нагрузки. Физически это невозможно, но в рамках ТХС это имеет вполне определенное описание. В ТХС это обозначается как неопределенность 1-го типа для СТТ.

Обсуждение

За последние 20 лет научной школой профессора В. М. Еськова был доказан ЭЭЗ. Это означало завершение дальнейшего применения теории динамических систем (ТДС) и всей стохастики при изучении СТТ, биосистем [11–17]. Фактически для таких утверждений было достаточно двух научных фактов: потеря эргодичности для любых параметров СТТ и потеря однородности выборок любых экспериментальных групп. Современная наука не создала теорию неэргодичных систем.

Попытки выдающихся математиков XX века В. И. Арнольда и Я. Г. Синая создать такую теорию не увенчались успехом. В итоге мы должны были отойти от изучения биосистем в рамках современной науки. Как нельзя одной точкой описывать стохастическую систему (нужна выборка), так и выборка не описывает СТТ [10–19].

Однако вся биомедицина, психология, экология и другие науки о жизни продолжают описывать системы в рамках ТДС (по точкам и фазовым траекториям в фазовом пространстве состояний (ФПС)). Это уже невозможно в принципе, нужна новая (третья) наука, и именно об этом говорил W. Weaver в 1948 году [10].

Двадцать лет назад мы начали доказывать потерю эргодичности СТТ и потерю однородности любой группы испытуемых. Очевидно, что ЭЕЗ завершает дальнейшее активное использование моделей ТДС и статистики для изучения СТТ. Возникает неопределенность 2-го типа для биосистем, и требуются новые модели и теория [1–9].

В новой науке о СТТ возникает не только неопределенность 2-го типа, но и появляется неопределенность 1-го типа. В этом случае статистика не дает различий, а новая наука (ТХС) может показать такие различия.

В настоящей статье показана именно неопределенность 1-го типа для энтропии Шеннона H . При увеличении нагрузки энтропия выборок ТМГ должна изменяться, но это не наблюдается в наших исследованиях. При этом энтропия H для ТМГ одного испытуемого в покое почти не изменяется. Возникает неопределенность 1-го типа.

Вывод

За последние 30 лет доказан ЭЕЗ, который для СТТ доказывает потерю эргодичности, т. е. для ТМГ и ТПГ. В этом случае мы говорили о неопределенности 2-го типа (статистика уже не работает для ТМГ).

Расчет энтропии Шеннона H показал, что энтропия существенно отличается (для ТМГ) от поведения статистических функций распределения $f(x)$, СПС и автокорреляций $A(t)$. Их числовые характеристики показывают неопределенность 2-го типа (потерю эргодичности, не совпадают выборки любых параметров функций организма $x_i(t)$). Однако энтропия H показывает неопределенность 1-го типа. В этом случае статистика не дает различий для разных состояний СТТ (на примере ТМГ).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Eskov V. M., Galkin V. A., Filatova O. E. The Connectedness between Past and Future States of Biosystems? *AIP Conference Proceedings*. 2022;2467:080027. DOI: 10.1063/5.0095266.
3. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. *Конец определенности: хаос гомеостатических систем* / под ред. А. А. Хадарцева, Г. С. Розенберга. Тула: Изд-во Тульское производственное полиграфическое объединение; 2017. 596 с.
4. Еськов В. М., Галкин В. А., Пятин В. Ф., Филатов М. А. *Организация движений: стохастика или хаос?* / под ред. Г. С. Розенберга. Самара: Издательство ООО «Порто-принт»; 2020. 144 с.
5. Filatova O. E., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Filatov M. A. Neural Network Technologies in System Synthesis. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047:012099. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012099.
6. Grigorenko V. V., Nazina N. B., Filatov M. A., Chempalova L. S., Tretyakov S. A. New Information Technologies in the Estimation of the Third Type Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889:032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032003.
7. Kozlova V. V., Galkin V. A., Filatov M. A. Diagnostics of Brain Neural Network States from the Perspective of Chaos. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889(5):2–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052016.
8. Gazya G. V., Eskov V. M. Uncertainty of the First Type in Industrial Ecology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839(042072). DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042072.

9. Еськов В. М., Григоренко В. В., Назина Н. Б. Отсутствие динамического хаоса Лоренца у кардиоинтервалов. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;2:55–64. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-55-66.
10. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
11. Газя Г. В., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Математические доказательства гипотезы Н. А. Бернштейна о «повторении без повторений». *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2023;1:89–100. DOI: 10.12737/2306-174X-2023-1-81-89.
12. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. Великие проблемы Гинзбурга и биомедицинские науки. *Вестник новых медицинских технологий*. 2021;28(2):115–120. DOI: 10.24412/1609-2163-2021-2-115-120.
13. Розенберг Г. С. Еще раз о редукционизме и холизме в системологии. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2022;4:57–72. DOI: 10.12737/2306-174X-2023-11-4-38-53.
14. Еськов В. М. Два подхода в познании природы человека. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2023;1:64–74. DOI: 10.12737/2306-174X-2023-1-64-71.
15. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Башкатова Ю. В. Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):54–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-8.
16. 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.
17. Филатова О. Е., Филатов М. А., Воронюк Т. В., Музиева М. И. Квантовомеханический подход в электрофизиологии. *Успехи кибернетики*. 2023;4(2):68–77. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-2-10.
18. Шакирова Л. С., Кухарева А. Ю., Еськов В. М. Неопределенность первого типа параметров сердечно-сосудистой системы девочек Югры. *Вестник новых медицинских технологий*. 2023;30(2):111–114. DOI: 10.24412/1609-2163-2023-2-111-114.
19. Коннов П. Е., Топазова О. В., Трофимов В. Н., Еськов В. В., Самойленко И. С. Нейросети в идентификации главных клинических признаков при актиническом дерматите. *Вестник новых медицинских технологий*. 2023;30(2):115–118. DOI: 10.24412/1609-2163-2023-2-115-118.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-05

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ФРАНЧАЙЗИНГА

Д. А. Абраменко^а, К. И. Бушмелева^б*Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а  *abramenk@gmail.com*, ^б *bkiya@yandex.ru*

Аннотация: проблемой прогнозирования финансовых данных часто задаются многие компании. В современном мире тяжело представить компанию, которая не планирует свои финансы на следующие периоды. Для управления и обработки определенных массивов данных используются различные программные продукты. Построение и прогнозирование финансовых моделей для франчайзинга является одной из наиболее важных задач при организации франчайзинговой деятельности. В каждой сфере бизнеса по-разному прогнозируют те или иные ресурсы, вследствие чего к программным продуктам предъявляется все больше требований, усложняются и совершенствуются процессы. Целью исследования является применение методов прогнозирования данных и их интерпретация на основе финансовых данных франчайзинговой точки «Додо Пицца».

Ключевые слова: прогнозирование, временной ряд, скользящее среднее, франчайзинг.

Для цитирования: Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Анализ точности методов прогнозирования финансовых результатов франчайзинга. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):40–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-05.

Поступила в редакцию: 15.02.2024.

В окончательном варианте: 09.03.2024.

ACCURACY ASSESSMENT FOR FRANCHISING FINANCIAL FORECASTING METHODS

D. A. Abramenko^a, K. I. Bushmeleva^b*Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^a  *abramenk@gmail.com*, ^b *bkiya@yandex.ru*

Abstract: the challenge of financial data forecasting is a ubiquitous concern across numerous corporations. In today's business landscape, the strategic planning of financials for future periods is an indispensable aspect of corporate management. To facilitate this, a plethora of software products are employed for the meticulous management and processing of specific datasets. Particularly in the context of franchising, the construction and projection of financial models emerge as paramount tasks within the framework of franchise operations. Distinct business domains necessitate varied forecasting resources, thereby escalating the demands on software products and engendering a trend towards increasingly complex and refined processes. This study aims to evaluate the efficacy of various data forecasting methodologies through their application to and interpretation of financial data derived from a Dodo Pizza franchise outlet.

Keywords: forecasting, time series, moving average, franchising.

Cite this article: Abramenko D. A., Bushmeleva K. I. Accuracy Assessment for Franchising Financial Forecasting Methods. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):40–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-05.

Original article submitted: 15.02.2024.

Revision submitted: 09.03.2024.

Введение

В данной работе предлагается использование некоторых методов прогнозирования для определения наименьших отклонений с реальными финансовыми данными. Анализ и сравнение параметров производятся на реальных данных для франчайзинговой точки «Додо Пицца». В дальнейшем планируется применение данных методов в информационной системе (ИС) «О, Франчайзинг» при построении финансовых моделей франшиз на основе исторических данных франчайзера.

Одной из наиболее распространенных групп методов прогнозирования финансовых данных являются количественные методы, основанные на регрессионном анализе и прогнозировании временных рядов.

Прогнозирование основано на предположении, что будущие показатели будут аналогичны предыдущим. Анализ временных рядов является одним из популярных приложений статистических методов в прогнозировании динамики финансовых показателей и других отраслях [1].

Как правило, методы прогнозирования включают следующие этапы:

1. Сбор и анализ необходимых исходных данных.
2. Использование математических моделей, статистических методов или других способов.
3. Выполнение необходимых расчетных процедур.
4. Оценка адекватности и достоверности получаемого прогноза.

В ИС «О, Франчайзинг» планируется, что владелец бизнеса (франчайзер) вносит в систему исторические (финансовые) данные деятельности своей компании за несколько рассматриваемых периодов. На основе этих данных и прочих показателей необходимо смоделировать финансовые модели будущих партнеров (франчайзи).

Для проведения эксперимента были выбраны финансовые результаты данных «Додо Пицца», которые расположены в свободном доступе сети интернет. На основе исторических данных франчайзинговой точки «Додо Пицца» г. Санкт-Петербург за 2018–2022 гг. были спрогнозированы данные EBITDA [2].

EBITDA — это показатель, равный прибыли до вычета процентов, налогов, износа и амортизации [3].

Для прогнозирования в статье рассматриваются следующие методы:

- метод скользящей средней;
- метод экспоненциального сглаживания.

Метод скользящей средней — один из часто встречающихся вариантов сглаживания временного ряда, выполняющийся по среднему арифметическому. Этот метод позволяет устранить выбросы и получить более стабильные результаты по средним значениям выбранного периода. Если в данных имеется периодичность и незаметные колебания, этот метод учитывает временной интервал ряда.

Основа данного метода — это применение формулы (1) для преобразования исходного временного ряда в ряд значений, которые были сглажены:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{p} \sum_{j=t-m}^{t+m} y_j, \quad (1)$$

где p — размер интервала, j — позиция в списке уровней в окне сглаживания, m — величина, определяемая по формуле: $m = \frac{p-1}{2}$.

График ряда приобретает более плавный облик, когда выбранный интервал становится больше в размере. Ниже представлен пример формулы (2), с помощью которой можно провести расчет трех интервалов:

$$\bar{y}_1 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}; \quad \bar{y}_2 = \frac{y_2 + y_3 + y_4}{3}; \quad \bar{y}_3 = \frac{y_3 + y_4 + y_5}{3}. \quad (2)$$

Ввиду того, что скользящая средняя будет располагаться в середине периода скользящего, то с определенной периодичностью для проведения расчетов используются нечетные варианты, поскольку среднее значение будет помещено в центр скользящего периода. Обычно проводят измерения по 2, 3 или 4 значениям.

На основе финансовых данных «Додо Пицца» составлена таблица данных по EBITDA франчайзинговой точки по периодам в разрезе 2018–2022 гг., представленная на рисунке 1.

Год	Месяц											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
2018	484 373	695 221	963 371	1 059 796	923 411	1 141 131	765 649	1 246 032	1 494 932	1 541 771	1 591 216	1 810 239
2019	1 309 595	1 294 618	1 627 362	932 550	960 606	921 480,92	958 882,22	964 064,46	1 030 038,19	1 078 266,49	1 023 381,64	1 357 482,46
2020	1 231 380	1 414 198	1 415 847	813 581	1 019 473	997 951	996 471	1 059 050	947 549	823 610	226 997	418 812
2021	417 573	926 643	908 465	675 699	1 028 422	665 574	745 223	1 151 511	1 382 929	1 677 512	876 815	1 800 503
2022	793 411	938 661	2 145 366	2 062 730	1 989 743	1 634 291	1 377 624	1 207 500	1 169 289	1 248 365	1 448 283	2 120 940

Рис. 1. Финансовый результат франчайзинговой точки «Додо Пицца» 2018–2022 гг [2]

Временной ряд содержит значения в разрезе 2018–2022 гг. по месяцам. Прогнозирование временного ряда осуществлялось по значениям финансового результата рисунка 1, по ряду значений двухмесячного (СК-2), трехмесячного (СК-3) и четырехмесячного (СК-4) периодов.

На основе прогнозных значений были рассчитаны абсолютные, относительные и квадратичные отклонения временного ряда. На рисунке 2 представлены результаты прогнозирования и рассчитанные значения отклонений.

Исходные			Скользящее среднее			Абсолютное отклонение			Относительное отклонение			Среднее квадратичное отклонение		
Год	Месяц	Значения	СК-2	СК-3	СК-4	СК-2	СК-3	СК-4	СК-2	СК-3	СК-4	СК-2	СК-3	СК-4
2018	1	484 373												
	2	695 221												
	3	963 371	589 797											
	4	1 059 796	829 296	714 322										
	5	923 411	1 011 583	906 129	800 690	88172	17282	122721	9,55%	1,87%	13,29%	363983	370736	389936
	6	1 141 131	991 603	982 193	910 450	149527	158938	230681	13,10%	13,93%	20,22%	367085	374084	393117
	7	765 649	1 032 271	1 041 446	1 021 927	266623	275797	256279	34,82%	36,02%	33,47%	369909	376912	395497
	8	1 246 032	953 390	943 397	972 497	292642	302635	273535	23,49%	24,29%	21,95%	371582	378560	397655
	9	1 494 932	1 005 840	1 050 937	1 019 056	489091	443995	475876	32,72%	29,70%	31,83%	372936	379872	399664
	10	1 541 771	1 370 482	1 168 871	1 161 936	171289	372900	379835	11,11%	24,19%	24,64%	370295	378506	398024
	11	1 591 216	1 518 351	1 427 578	1 262 096	72864	163637	329120	4,58%	10,28%	20,68%	373194	378617	398380
	12	1 810 239	1 566 493	1 542 640	1 468 488	243746	267600	341751	13,46%	14,78%	18,88%	376839	381746	399668
2019	1	1 309 595	1 700 727	1 647 742	1 609 539	391132	338147	299944	29,87%	25,82%	22,90%	379115	383763	400786
	2	1 294 618	1 559 917	1 570 350	1 563 205	265299	275732	268587	20,49%	21,30%	20,75%	378855	384675	402657
	3	1 627 362	1 302 107	1 471 484	1 501 417	325255	155878	125945	19,99%	9,58%	7,74%	380948	386702	405079
	4	932 550	1 460 990	1 410 525	1 510 453	528440	477975	577904	56,67%	51,25%	61,97%	382094	390284	409125
	5	960 606	1 279 956	1 284 843	1 291 031	319350	324237	330425	33,24%	33,75%	34,40%	378110	388061	404471
	6	921 480,92	946 578	1 173 506	1 203 784	25097	252025	282303	2,72%	27,35%	30,64%	379368	389421	406032
	7	958 882,22	941 043	938 212	1 110 500	17839	20670	151617	1,86%	2,16%	15,81%	383838	392106	408522
	8	964 064,46	940 182	946 990	943 380	23883	17075	20685	2,48%	1,77%	2,15%	388481	396846	412795
	9	1 030 038,19	961 473	948 143	951 258	68565	81896	78780	6,66%	7,95%	7,65%	393289	401767	417911
	10	1 078 266,49	997 051	984 328	968 616	81215	93938	109650	7,53%	8,71%	10,17%	398148	406674	423046
	11	1 023 381,64	1 054 152	1 024 123	1 007 813	30771	741	15569	3,01%	0,07%	1,52%	403138	411708	428207
	12	1 357 482,46	1 050 824	1 043 895	1 023 938	306658	313587	333545	22,59%	23,10%	24,57%	408518	417234	433948
2020	1	1 231 380	1 190 432	1 153 044	1 122 292	40948	78337	109088	3,33%	6,36%	8,86%	410987	419748	436407
	2	1 414 198	1 294 431	1 204 081	1 172 628	119767	210117	241571	8,47%	14,86%	17,08%	416759	425497	442213
	3	1 415 847	1 322 789	1 334 354	1 256 611	93058	81494	159237	6,57%	5,76%	11,25%	422345	430202	446753
	4	813 581	1 415 023	1 353 809	1 354 727	601442	540228	541146	73,93%	66,40%	66,51%	428390	436441	452623
	5	1 019 473	1 114 714	1 214 542	1 218 752	95241	195069	199279	9,34%	19,13%	19,55%	421840	432797	449576
	6	997 951	916 527	1 082 967	1 165 775	81423	85017	167824	8,16%	8,52%	16,82%	428248	438324	455365
	7	996 471	1 008 712	943 668	1 061 713	12241	52802	65242	1,23%	5,30%	6,55%	435073	445299	461877
	8	1 059 050	997 211	1 004 631	956 869	61839	54418	102181	5,84%	5,14%	9,65%	442505	452806	469617
	9	947 549	1 027 760	1 017 824	1 018 236	80211	70274	70687	8,47%	7,42%	7,46%	450186	460706	477539
	10	823 610	1 003 299	1 001 023	1 000 255	179690	177413	176645	21,82%	21,54%	21,45%	458187	468965	486112
	11	226 997	885 580	943 403	956 670	658583	716406	729673	290,13%	315,60%	321,45%	465583	476630	494159
	12	418 812	525 303	666 052	764 301	106492	247240	345490	25,43%	59,03%	82,49%	456168	464471	482352
2021	1	417 573	322 904	489 806	604 242	94668	72233	186669	22,67%	17,30%	44,70%	465067	471355	487221
	2	926 643	418 192	354 460	471 748	508451	572183	454895	54,87%	61,75%	49,09%	474659	481257	496176
	3	908 465	672 108	587 676	497 506	236357	320789	410959	26,02%	35,31%	45,24%	473066	476712	497971
	4	675 699	917 554	750 894	667 873	241855	75195	7826	35,79%	11,13%	1,16%	481443	482883	501738
	5	1 028 422	792 082	836 936	732 095	236340	191486	296327	22,98%	18,62%	28,81%	490359	494522	514126
	6	665 574	852 061	870 862	884 807	186487	205288	219233	28,02%	30,84%	32,94%	500168	505464	523083
	7	745 223	846 998	789 898	819 540	101775	44675	74317	13,66%	5,99%	9,97%	511990	517055	534927
	8	1 151 511	705 399	813 073	778 730	446113	338438	372782	38,74%	29,39%	32,37%	526255	531935	550140
	9	1 382 929	948 367	854 103	897 683	434562	528826	485247	31,42%	38,24%	35,09%	530862	541739	559360
	10	1 677 512	1 267 220	1 093 221	986 309	410292	584291	691203	24,46%	34,83%	41,20%	536668	542589	563955
	11	876 815	1 530 221	1 403 984	1 239 294	653406	527169	362479	74,52%	60,12%	41,34%	544574	539487	553748
	12	1 800 503	1 277 164	1 312 419	1 272 192	523340	488084	528311	29,07%	27,11%	29,34%	535287	540423	565789
2022	1	793 411	1 338 659	1 451 610	1 434 440	545248	658199	641029	68,72%	82,96%	80,79%	536270	544557	568801
	2	938 661	1 296 957	1 156 910	1 287 060	358296	218249	348399	38,17%	23,25%	37,12%	535447	533026	561775
	3	2 145 366	866 036	1 177 525	1 102 348	1279330	967841	1043019	59,63%	45,11%	48,62%	550033	554766	578802
	4	2 062 730	1 542 014	1 292 479	1 419 485	520717	770251	643245	25,24%	37,34%	31,18%	592807	487731	501357
	5	1 989 743	2 104 048	1 715 586	1 485 042	114305	274157	504701	5,74%	13,78%	25,37%	373753	439836	480685
	6	1 634 291	2 026 237	2 065 946	1 784 125	391946	431655	149834	23,98%	26,41%	9,17%	397216	458645	477156
	7	1 377 624	1 812 017	1 895 588	1 958 033	434393	517964	580409	31,53%	37,60%	42,13%	398087	462990	511744
	8	1 207 500	1 505 958	1 667 219	1 766 097	298458	459719	558597	24,72%	38,07%	46,26%	390421	451192	496874
	9	1 169 289	1 292 562	1 406 472	1 552 290	123273	237183	383001	10,54%	20,28%	32,75%	410203	449035	480205
	10	1 248 365	1 188 395	1 251 471	1 347 176	59971	3106	98811	4,80%	0,25%	7,92%	468285	500092	508494
	11	1 448 283	1 208 827	1 208 385	1 250 695	239456	239898	197589	16,53%	16,56%	13,64%	571959	612481	618844
	12	2 120 940	1 348 324	1 288 646	1 268 359	772616	832294	852581	36,43%	39,24%	40,20%	772616	832294	852581
Итого сред.		1 148 891	1 135 279	1 138 179	1 140 323	276 787	293 262	321 505	27,87%	29,54%	32,51%	441 491	456 647	476 155

Рис. 2. Рассчитанные значения временного ряда по методу средней скользящей

По результатам прогнозирования был построен график заданного временного ряда и рассчитаны прогнозные значения, которые, в свою очередь, представлены на рисунке 3.

Анализ данных, представленных на рисунке 3, позволил сделать выводы о применении данного метода.

Преимущества. Во-первых, метод эффективен в выявлении недавно замеченных тенденций и не подвержен влиянию трендов, характерных для более ранних периодов. При составлении прогноза

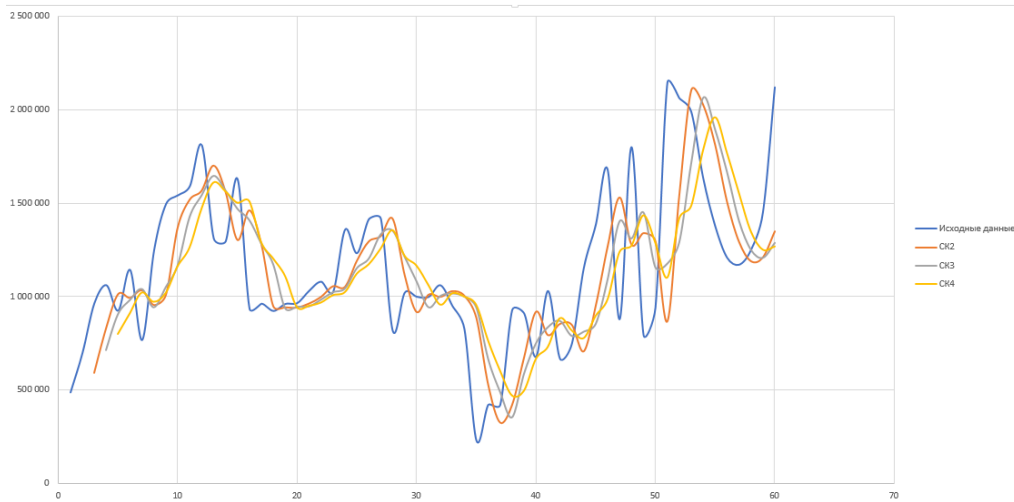


Рис. 3. График временного ряда по методу средней скользящей

данные тренды не имеют существенного влияния. Во-вторых, учитываются только свежие данные, что для определенных задач является плюсом.

Недостатки. Во-первых, при применении сглаживания происходит уменьшение размера последовательности путем учета как предыдущих, так и будущих наблюдений. Во-вторых, отклонения последних уровней ряда от общего тренда исследуемого показателя не свидетельствуют о начале нового тренда, а представляют собой случайные колебания.

В результате было сделано заключение, что составление прогнозов посредством применения данного метода может привести к неправильным выводам и, как следствие, к неправильным решениям.

Следующий метод, который рассматривался для решения поставленной задачи, — метод экспоненциального сглаживания. Этот метод заключается в повышении гладкости временных рядов, их математическом преобразовании и используется при прогнозировании временных рядов [4].

В то время, как в обычной скользящей средней предыдущие наблюдения имеют одинаковый вес, экспоненциальные оконные функции применяются для присвоения экспоненциально убывающего значения весов с течением времени [5].

У данного метода имеется несколько вариантов:

- метод одинарного сглаживания предназначен для обработки рядов данных, не обладающих трендом и сезонностью;
- двойное сглаживание — для рядов с наличием тенденции, но отсутствием сезонности;
- трехкратное сглаживание может быть использовано для данных, которые обладают и трендом, и сезонностью.

Существует формула для построения прогноза, которая имеет следующий вид (3):

$$\hat{Y}_{t+1} = k * Y_t + (1 - k) * \hat{Y}_t, \quad (3)$$

где $\hat{Y}_{t+1}$ — прогноз на следующий период $t + 1$; Y_t — значения, применяемые для прогноза за текущий период t (выручка по месяцам); k — коэффициент сглаживания ряда. Этот коэффициент используется при прогнозировании временных рядов и помогает сгладить колебания данных. Вводится пользователем и ограничивается значениями от 0 до 1, данный коэффициент позволяет более точно предсказывать будущие значения ряда в промежутке от 0 до 1, $0 < k < 1$. Чем выше значение данного коэффициента, тем сильнее его воздействие последних периодов на прогноз; $\hat{Y}_t$ — важность прогноза на настоящий момент t .

Прогнозирование временного ряда осуществлялось по значениям финансового результата, представленным на рисунке 1.

При проведении эксперимента наилучший результат отклонения показали данные, при которых коэффициент сглаживания ряда равен 6. Результаты прогнозирования представлены на рисунке 4. На основе прогнозных значений были рассчитаны абсолютные, относительные и квадратичные отклонения временного ряда. На рисунке 4 представлены результаты прогнозирования и рассчитанные значения отклонений.

		альфа:	0,6			
Исходные						
Год	Месяц	помесечно	Прогноз	Абс. отклонение	Отн. отклонение	Среднее кв. Отклонение
2018	1	484 373	484373	0	0,00%	347104
	2	695 221	484373	210848	30,33%	350033
	3	963 371	610882	352489	36,59%	351951
	4	1 059 796	822375	237420	22,40%	351941
	5	923 411	964828	41416	4,49%	353649
	6	1 141 131	939978	201153	17,63%	356806
	7	765 649	1060670	295021	38,53%	359053
	8	1 246 032	883657	362375	29,08%	360152
	9	1 494 932	1101082	393850	26,35%	360109
	10	1 541 771	1337392	204379	13,26%	359415
	11	1 591 216	1460019	131196	8,25%	361839
	12	1 810 239	1538737	271502	15,00%	365032
2019	1	1 309 595	1701638	392043	29,94%	366727
	2	1 294 618	1466412	171794	13,27%	366169
	3	1 627 362	1363336	264026	16,22%	369260
	4	932 550	1521751	589202	63,18%	371260
	5	960 606	1168230	207624	21,61%	364797
	6	921 480,92	1043656	122175	13,26%	367653
	7	958 882,22	970351	11469	1,20%	371527
	8	964 064,46	963470	595	0,06%	376026
	9	1 030 038,19	963827	66212	6,43%	380697
	10	1 078 266,49	1003554	74713	6,93%	385401
	11	1 023 381,64	1048381	25000	2,44%	390251
	12	1 357 482,46	1033382	324101	23,88%	395468
2020	1	1 231 380	1227842	3538	0,29%	397268
	2	1 414 198	1229965	184234	13,03%	402903
	3	1 415 847	1340505	75342	5,32%	407562
	4	813 581	1385710	572129	70,32%	413483
	5	1 019 473	1042433	22960	2,25%	407531
	6	997 951	1028657	30706	3,08%	414032
	7	996 471	1010233	13762	1,38%	420838
	8	1 059 050	1001976	57074	5,39%	428025
	9	947 549	1036220	88671	9,36%	435468
	10	823 610	983018	159408	19,35%	443130
	11	226 997	887373	660376	290,92%	450488
	12	418 812	491147	72336	17,27%	440015
2021	1	417 573	447746	30173	7,23%	448846
	2	926 643	429642	497001	53,63%	458456
	3	908 465	727843	180622	19,88%	456627
	4	675 699	836216	160517	23,76%	465707
	5	1 028 422	739906	288516	28,05%	475856
	6	665 574	913016	247442	37,18%	483711
	7	745 223	764551	19328	2,59%	493531
	8	1 151 511	752954	398557	34,61%	507818
	9	1 382 929	992088	390841	28,26%	513876
	10	1 677 512	1226593	450919	26,88%	521046
	11	876 815	1497144	620329	70,75%	525698
	12	1 800 503	1124947	675556	37,52%	517702
2022	1	793 411	1530280	736869	92,87%	502313
	2	938 661	1088159	149498	15,93%	475285
	3	2 145 366	998460	1146906	53,46%	496236
	4	2 062 730	1686604	376126	18,23%	357010
	5	1 989 743	1912279	77464	3,89%	354548
	6	1 634 291	1958758	324467	19,85%	377896
	7	1 377 624	1764078	386454	28,05%	386082
	8	1 207 500	1532205	324705	26,89%	386008
	9	1 169 289	1337382	168093	14,38%	399868
	10	1 248 365	1236526	11839	0,95%	451413
	11	1 448 283	1243630	204653	14,13%	552802
	12	2 120 940	1366422	754518	35,57%	754518
Итого сред.		1148891	1111814	258542	26,21%	420099

Рис. 4. Рассчитанные значения временного ряда по методу экспоненциального сглаживания

По результатам прогнозирования был построен график заданного временного ряда и рассчитаны относительно него прогнозные значения, представленные на рисунке 5.

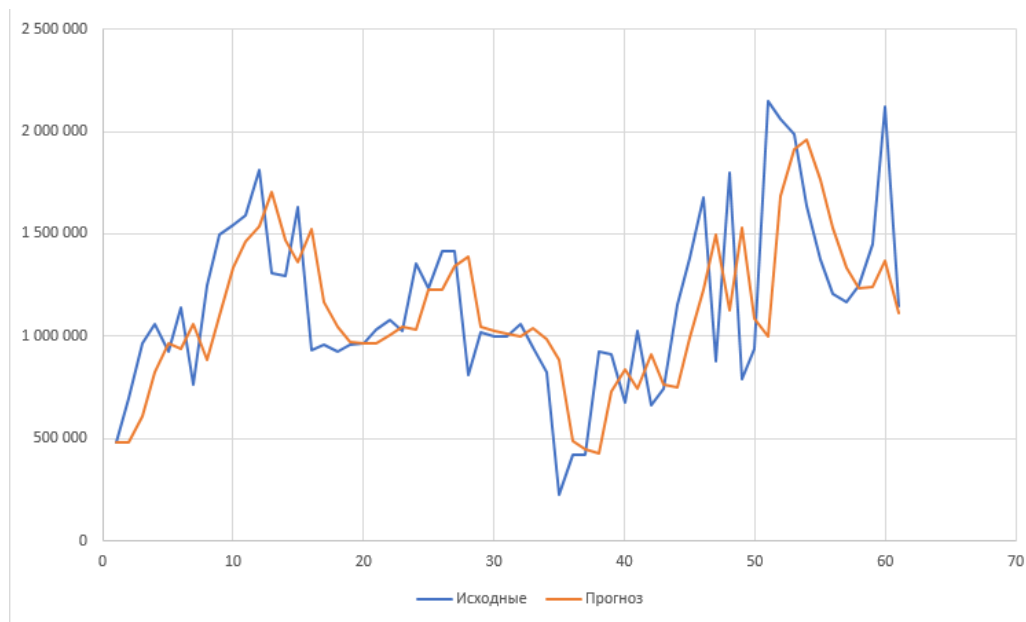


Рис. 5. График временного ряда по методу экспоненциального сглаживания

Этот способ прогнозирования считается одним из самых простых, но не наилучшим, так как его применение ограничено только краткосрочными перспективами. Он часто используется для последовательностей, где присутствует сезонность.

В таблице 1 представлены положительные и отрицательные стороны использования каждого из анализируемых методов, позволившие сделать вывод о дальнейшем их применении для прогнозирования и определения наименьших отклонений с реальными финансовыми данными ИС «О, Франчайзинг».

Таблица 1

Характеристика методов прогнозирования временных рядов

Название	Положительная сторона	Отрицательная сторона
Метод скользящей средней	Простота моделирования. Учет актуальных (свежих) данных	Нет широкого анализа исходных данных. Рассматриваются как предыдущие, так и будущие наблюдения
Метод экспоненциального сглаживания	Простота моделирования. Прогнозы строятся на краткосрочный период	Недостаточно гибкая модель. Нет широко применения

Необходимо отметить, что рассмотренные методы не позволяют полноценно спрогнозировать длительные периоды, они больше подходят для прогнозирования краткосрочных периодов, так как отклонения слишком велики. Также данные методы не учитывают сезонность, что является важным для финансовых моделей. На основе данной финансовой модели в следующей работе будут рассмотрены методы прогнозирования, учитывающие сезонность.

Заключение

В заключении следует отметить, что существует большое количество различных методов прогнозирования, и при этом каждый обладает своими достоинствами и недостатками для той или иной сферы анализа, задач и типов временного ряда. В данной работе рассматривались методы скользящей средней и экспоненциального сглаживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников А. Н. *Элементарная теория анализа и статистическое моделирование временных рядов*: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань; 2021. 212 с.
2. Данные о франшизе Додо Пицца. Режим доступа: <https://dodofranchise.ru>.
3. Ebitda. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/EBITDA>.
4. Экспоненциальное сглаживание. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Экспоненциальное_сглаживание.
5. Сунчалин А. М. Обзор методов и моделей прогнозирования финансовых временных рядов. *Хроноэкономика*. 2020;1:26–30.
6. Бутакова М. М. *Экономическое прогнозирование: методы и приемы практических расчетов*. М.: КНОРУС; 2010. 168 с.
7. Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Методы и этапы организации франчайзинговой деятельности посредством реализации информационной системы. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*: сб. тр. XVIII Международ. научно-практ. конф. М.; 2021. С. 16–21.
8. Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Проектирование информационной системы «О, франчайзинг». *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*: сб. тр. XIX Международ. научно-практ. конф. М.; 2022. С. 34–38.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-06

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В. З. Манусов^{1,a}, Г. В. Иванов^{2,b}, Е. Ю. Кислицин^{2,c}, С. В. Горелов^{1,d}

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7799-4830>, manusov36@mail.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8640-9605>, ivanov_gv@surgu.ru

^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9747-3917>, kislitsin_eu@surgu.ru

^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9048-7104>, kese@nsawt.ru

Аннотация: в работе рассмотрены технические мероприятия, реализация которых позволит повысить качество электроснабжения электроустановок нефтегазовых месторождений, удаленных от централизованных узлов электроснабжения, а именно увеличить пропускную способность существующих промысловых воздушных линий (ВЛ) 6 кВ. В качестве примера была проанализирована работа воздушной линии протяженностью 12,338 км (с учетом проектируемой отпайки) при различных электрических нагрузках. С целью электроснабжения вновь вводимых в эксплуатацию объектов организацией, обслуживающей электроустановки рассматриваемого комплекса добычи углеводородов, было предложено строительство отпайки от существующей ВЛ 6 кВ. Поскольку подключение новых электроприемников ожидаемо приводит к увеличению нагрузки на существующую линию, кроме расчета электрических нагрузок, с целью определения расчетной токовой нагрузки и проверки сечения проводов по длительно допустимому току, был выполнен расчет величины напряжения в предполагаемой точке подключения с учетом проектируемой нагрузки, который выявил снижение величины напряжения ниже параметров, регламентированных ГОСТ 32144-2013. Предложено использовать пункт автоматического регулирования напряжения на основе вольтодобавочного трансформатора. Расчетным путем подтверждена эффективность применения вольтодобавочного трансформатора для повышения пропускной способности линии. Одним из преимуществ рассмотренного способа повышения качества электроснабжения промышленных объектов является быстрота реализации по сравнению с другими возможными способами.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, пункт автоматического регулирования напряжения, электроснабжение, объекты нефтегазовой отрасли, линия электропередачи, качество электроснабжения.

Для цитирования: Манусов В. З., Иванов Г. В., Кислицин Е. Ю., Горелов С. В. Повышение пропускной способности воздушной линии с помощью вольтодобавочного трансформатора. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):47–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-06.

Поступила в редакцию: 14.02.2024.

В окончательном варианте: 10.03.2024.

INCREASING THE OVERHEAD POWER LINE CAPACITY USING A BOOSTER TRANSFORMER

V. Z. Manusov^{1,a}, G. V. Ivanov^{2,b}, E. Yu. Kislitsin^{2,c}, S. V. Gorelov^{1,d}

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7799-4830>, manusov36@mail.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8640-9605>, ivanov_gv@surgu.ru

^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9747-3917>, kislitsin_eu@surgu.ru

^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9048-7104>, kese@nsawt.ru

Abstract: this study evaluates technical interventions aimed at enhancing the power supply quality to electrical systems within oil and gas fields that are distantly located from centralized power supply points, specifically by augmenting the capacity of existing 6 kV field overhead lines. Utilizing a case study, the

performance of an overhead line spanning 12.338 km (inclusive of anticipated desoldering) under varied electrical load conditions was examined. To facilitate the electrification of newly inaugurated facilities, the entity responsible for the electrical infrastructure of the referenced hydrocarbon extraction complex suggested the creation of a decoupling from the current 6 kV overhead line. Given the expected addition of new electrical consumers, which would result in an increased load on the pre-existing line, the study not only computed electrical loads but also estimated the projected current load and evaluated the wire cross-section for long-term allowable current. Additionally, the voltage level at the proposed connection point was calculated with the anticipated load in mind, revealing a reduction in voltage below the standards mandated by GOST 32144-2013. The implementation of an automatic voltage regulation node employing a booster transformer is recommended. The paper calculates the effectiveness of using a booster transformer to expand line capacity and highlights the method's advantage of rapid deployment compared to alternative solutions for improving power supply quality to industrial installations.

Keywords: booster transformer, automatic voltage control, power supply, oil and gas industry facilities, power transmission line, power supply quality.

Cite this article: Manusov V. Z., Ivanov G. V., Kislitsin E. Yu., Gorelov S. V. Increasing the Overhead Power Line Capacity Using a Booster Transformer. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):47–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-06.

Original article submitted: 14.02.2024.

Revision submitted: 10.03.2024.

Введение

Одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации является нефтегазовая отрасль. Существование и развитие этой отрасли, как и любой другой, неразрывно связано с не менее важной – электроэнергетикой. При этом часть месторождений находятся вдали от централизованных источников питания, в районах Крайнего Севера. Электроснабжение электроустановок в этом случае является сложной технической задачей.

При разработке нефтегазовых месторождений, находящихся вдали от централизованных источников питания, целесообразно использовать локальные электростанции, построенные на базе автономных генерирующих устройств, использующих в качестве энергоносителя попутный нефтяной газ [1–3].

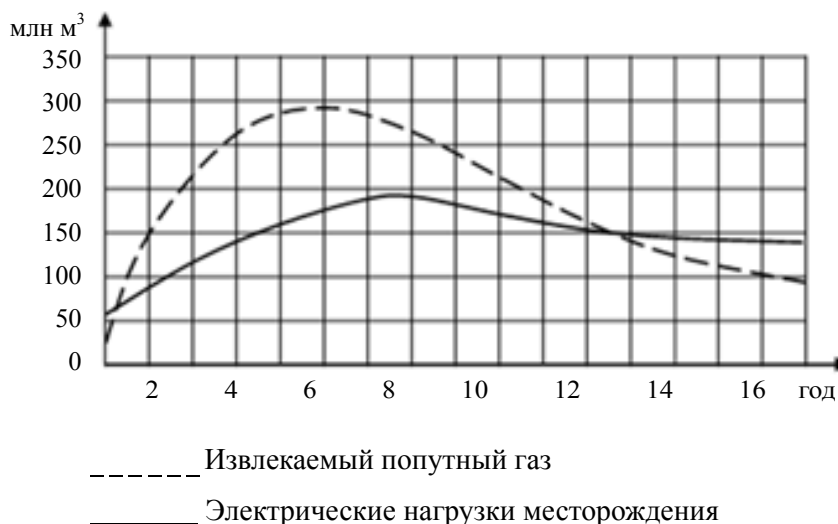


Рис. 1. Изменение соотношения между величиной электрических нагрузок и объемом попутного нефтяного газа [1]

Однако это решение не всегда удовлетворяет требованиям надежности электроснабжения электроустановок предприятий по добыче углеводородов, поскольку электрические нагрузки месторождения в период его эксплуатации не соответствуют количеству извлекаемого углеводородного сырья: на начальном этапе эксплуатации месторождения объем добываемого попутного нефтяного газа превышает потребности генерирующих электрическую энергию установок, на 12 год эксплуатации, напротив, объемов нефтяного газа недостаточно, чтобы покрыть электрические нагрузки месторождения.

В настоящее время в качестве источников электроснабжения таких систем на предприятиях по добыче углеводородов применяются такие установки, как:

- паросиловые установки, которые обеспечивают потребителя теплом и электрической энергией;
- газотурбинные установки (ГТЭС), также — генерация электрической энергии и тепла (тепло отработанных продуктов горения);
- газодизельные электростанции;
- комбинированные источники электрической энергии [4].

При недостаточном объеме попутного нефтяного газа дефицит электрической энергии восполняется строительством ЛЭП от ближайшего промысла с избыточными объемами попутного газа. Помощью таких ЛЭП объединяется ряд удаленных от узлов централизованного электроснабжения месторождений, кустовые насосные станции и прочие объекты предприятий по добыче и транспортировке углеводородов. Таким образом формируется собственная энергосистема.

Описание объекта исследования. Предлагаемое техническое решение

Промысловые электрические сети представлены преимущественно воздушными линиями электропередач, выполненными неизолированными витыми проводами типа А, АС. При этом порядка 55% от всей протяженности линий класса напряжения 6–35 кВ эксплуатируются уже более 35 лет [5]. В процессе эксплуатации месторождений нагрузка на промышленные сети возрастает в результате подключения вновь вводимых в работу объектов. В период аварийных отключений или вывода в ремонт части ГТЭС эта нагрузка достигает значений, при которых уровень напряжения на вводах энергопринимающих устройств не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013.

Кроме того, для предприятий по добыче углеводородов характерными потребителями электроэнергии являются насосные агрегаты с приводом от электродвигателей, которые, в свою очередь, восприимчивы к изменению напряжения питающей сети [6].

Таким образом, вопрос о необходимости модернизации промышленных сетей электроснабжения 10(6) кВ в ближайшем будущем будет являться актуальным.

При этом, например, возможны такие пути решения обозначенной проблемы, как:

- 1) реконструкция ВЛ с заменой опор, арматуры, проводов;
- 2) перевод ЛЭП на более высокий класс напряжения;
- 3) установка вольтодобавочных трансформаторов;
- 4) оптимизация режима работы электроустановок месторождений.

Как уже было сказано выше, промышленные сети электроснабжения довольно часто располагаются в районе, куда затруднена доставка материалов, средств большой механизации. В этом случае в качестве быстрого эффективного способа повышения качества электроснабжения используется установка вольтодобавочного трансформатора [7, 8].

В качестве объекта исследования рассмотрим ВЛ 6 кВ, которая соединяет между собой энергопринимающие устройства объектов, относящихся к нескольким нефтяным месторождениям. С целью электроснабжения вновь вводимых в эксплуатацию объектов организацией, обслуживающей электроустановки рассматриваемого комплекса добычи углеводородов, было предложено строительство отпайки от существующей ВЛ 6 кВ (от оп. 97).

Характеристика объекта:

- протяженность 12,338 км;
- выполнена проводом А 50;
- расчетная нагрузка 785,7 кВт (с учетом проектируемой нагрузки).

Для корректного установления значения напряжения линии определялась расчетная мощность в каждом ее узле.

Напряжение в начале линии принималось равным 6,3 кВ.

Расчет параметров сети 6 кВ. Результаты расчета

Предварительный расчет падения напряжения на участке проводился по формуле:

$$U_2 = U_1 - \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1} \cdot 0,001, \quad (1)$$

где U_1 — напряжение в начале участка, кВ; U_2 — напряжение в конце участка, кВ; P_1 — мощность в начале участка, кВт. P_1 вычисляется по формуле:

Таблица 1

Расчет падения напряжения в линии при подключении новых объектов

Назначение линии			Расчетная нагрузка линии		Марка и сечение провода	Длина участка, км	Результаты расчетов падения напряжения				
Тип	начало	конец	P , кВт	Q , кВ·Ар			U_1 , кВ	ΔU , кВ	$\Delta U_{от\text{ ип}}$, кВ	U_2 , кВ	ΔU , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВЛ 6 кВ	ЗРУ-6 кВ ПС "№1" яч.4	ф."№1" оп.9 (отп.на КТП-1-25)	785,7	310,5	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,533	6,30	0,052	0,052	6,25	-0,82
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.9	ф."№1" оп.11 (отп.на КТП-2-160)	776,3	306,8	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,145	6,25	0,014	0,065	6,23	-1,04
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.11	ф."№1" оп.19 (отп.на КТП-3-160, КТП-4-160)	715,9	282,9	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,630	6,23	0,056	0,122	6,18	-1,93
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.19	ф."№1" оп.31 (отп.на КТП-5-160, КТП-6-63)	655,5	259,1	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,730	6,18	0,060	0,182	6,12	-2,88
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.31	ф."№1" оп.40 (отп.на КТП-7-160)	571,3	225,8	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,460	6,12	0,033	0,215	6,09	-3,41
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.40	ф."№1" оп.97 (отп.на КТП-8-63)	510,9	201,9	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	3,620	6,09	0,236	0,450	5,85	-7,15
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.97 (проект)	ф."№1" оп.191 (отп.на КТП-9-250, КТП-10-630, КТП-11-160, КТП-12-250)	487,1	192,5	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	6,220	5,85	0,401	0,852	5,45	-13,52

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{12}, \quad (2)$$

где P_2 — мощность в конце участка, кВт; ΔP_{12} — потери активной мощности на участке, кВт; Q_1 — мощность в начале участка, кВ·Ар. Q_1 вычисляется по формуле:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q_{12}, \quad (3)$$

где Q_2 — мощность в конце участка, кВ·Ар; ΔQ_{12} — потери реактивной мощности на участке, кВ·Ар; R — активное сопротивление ВЛ на участке, Ом; X — реактивное сопротивление ВЛ на участке, Ом.

Потери активной мощности:

$$\Delta P = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot R. \quad (4)$$

Потери реактивной мощности:

$$\Delta Q = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot X. \quad (5)$$

Результаты расчета показали после подключения к существующей ВЛ 6 кВ проектируемых мощностей наличие отклонения напряжения (13,52%) от номинального значения, что не соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 (табл. 1).

Для устранения падения напряжения предлагается применить пункт автоматического регулирования напряжения (ПАРН) с диапазоном регулирования 15%, состоящий из трех вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) номиналом 100А.



Рис. 2. Пример установки ВДТ в линии 10(6) кВ

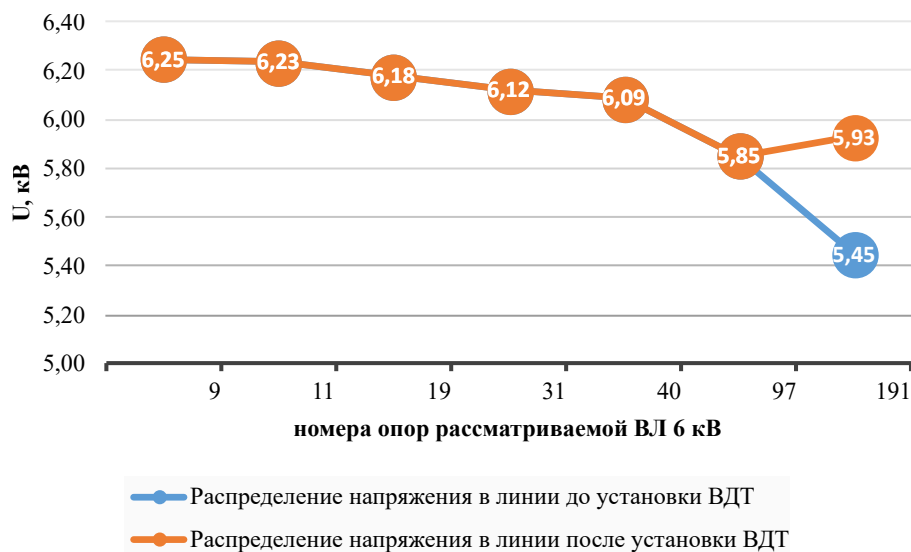


Рис. 3. Распределение напряжения в линии 6 кВ

Таблица 2

Расчет падения напряжения в линии после установки ВДТ

Назначение линии			Расчетная нагрузка линии		Марка и сечение провода	Длина участка, км	Результаты расчетов падения напряжения				
Тип	начало	конец	P, кВт	Q, кВт·Ар			U ₁ , кВ	ΔU , кВ	$\Delta U_{от\text{ ип}}$, кВ	U ₂ , кВ	ΔU , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВЛ 6 кВ	ЗРУ-6 кВ ПС "№1"яч.4	ф."№1" оп.9 (отп.на КТП-1-25)	785,7	310,5	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,533	6,30	0,052	0,052	6,25	-0,82
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.9	ф."№1" оп.11 (отп.на КТП-2-160)	776,3	306,8	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,145	6,25	0,014	0,065	6,23	-1,04
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.11	ф."№1" оп.19 (отп.на КТП-3-160, КТП-4-160)	715,9	282,9	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,630	6,23	0,056	0,122	6,18	-1,93
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.19	ф."№1" оп.31 (отп.на КТП-5-160, КТП-6-63)	655,5	259,1	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,730	6,18	0,060	0,182	6,12	-2,88
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.31	ф."№1" оп.40 (отп.на КТП-7-160)	571,3	225,8	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	0,460	6,12	0,033	0,215	6,09	-3,41
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.40	ф."№1" оп.97 (отп.на КТП-8-63)	510,9	201,9	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	3,620	6,09	0,236	0,450	5,85	-7,15
ВЛ 6 кВ	ф."№1" оп.97 (проект)	ф."№1" оп.191 (отп.на КТП-9-250, КТП-10-630, КТП-11-160, КТП-12-250)	487,1	192,5	3 х А-50 (по ГОСТ 839-80)	6,220	6,30	0,373	0,823	5,93	-5,92

Функционирование ПАРН основано на регулировании напряжения высоковольтным ВДТ с определенным диапазоном регулирования. Кроме того, конструкцией ПАРН предусмотрено централизованное управление ВДТ, с этой целью ПАРН комплектуется блоком управления на базе микропроцессорных устройств.

Расчетом было определено возможное место установки ПАРН (табл. 2).

График распределения напряжения на различных участках рассматриваемой ВЛ 6 кВ представлен на рисунке 3.

Вывод

Установка ПАРН из трех ВДТ обеспечит нормальный уровень напряжения на протяжении всей длины линии в нормальном режиме и в период аварийного отключения или вывода в ремонт части ГТЭС. Это говорит о возможности применения ВДТ как эффективного и быстрого способа повышения качества электроснабжения потребителей, расположенных вдали от централизованных источников электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турышева А. В. Повышение эффективности энергоснабжения нефтегазовых месторождений при использовании попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя. *Современная техника и технологии*. 2014;5. Режим доступа: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3875>.
2. Ивановский В. Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления. *Инженерная практика: Российский нефтегазовый журнал о технологиях и оборудовании*. 2011;6:9–18.
3. Муровский С. П., Курзо А. Н., Муровская А. С. Эффективность внедрения децентрализованных комбинированных энергосистем на базе ВИЭ для удаленных потребителей. *Актуальные проблемы общества в современном научном пространстве*: Сб. науч. ст. Ч. 2. Уфа: Аэтерна; 2017. С. 13–16.
4. Кукула Ю. М., Глебова Л. В. Современное состояние систем энергоснабжения нефтегазодобывающих предприятий на удаленных от инфраструктуры территориях и их перспективы. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2020;6:85–88. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-6(120)-85-88.
5. Латыпов И. С., Сушков В. В., Хмара Г. А. Увеличение пропускной способности электрической сети и повышение энергоэффективности действующей электроэнергетической системы нефтегазопромышленных потребителей. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(4):236–247. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3497.
6. Бадрызов Д. Системы автономного энергообеспечения нефтяных месторождений. *Нефтегазовая вертикаль*. 2006;9–10:128–130.
7. Перинский Т. В., Клыков А. В. Опыт применения пунктов автоматического регулирования напряжения ПАРН серии ВДТ/VR-32 в распределительных электрических сетях 6–10 кВ. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012;1:42–48.
8. Перинский Т. В., Родионов О. С. Повышение пропускной способности ВЛ 6–10 кВ. *Новости электротехники*. 2007;4:50–51.
9. *Группа РУСЭЛТ: производство и поставка промышленного электротехнического оборудования*. Режим доступа: <http://www.ruselt.ru>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**Л. Л. Семенова***Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-0996>, semenova_ll@surgu.ru*

Аннотация: проведен сравнительный анализ энергоэффективности протоколов LEACH и PEGASIS в контексте их применения в территориально распределенных беспроводных сенсорных сетях. Исследование направлено на выявление зависимости между выбором протокола и энергетической эффективностью сети, а также на определение влияния этих протоколов на продолжительность жизни сенсорных сетей. Результаты моделирования демонстрируют, что протокол PEGASIS превосходит LEACH по обоим параметрам, обеспечивая более длительную работу сети и улучшенную энергоэффективность. На основании полученных результатов может быть определен один из факторов оптимальных стратегий развертывания сенсорных сетей, учитывая их энергетические характеристики и требования к продолжительности функционирования.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, энергоэффективность, передача данных, иерархические протоколы, протокол LEACH, протокол PEGASIS.

Для цитирования: Семенова Л. Л. Сравнительный анализ энергоэффективности иерархических протоколов передачи данных в территориально распределенных беспроводных сенсорных сетях. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):54–60. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07.

*Поступила в редакцию: 14.02.2024.**В окончательном варианте: 07.03.2024.***COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HIERARCHICAL DATA TRANSMISSION PROTOCOLS IN GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED WIRELESS SENSOR NETWORKS****L. L. Semenova***Surgut State University, Surgut, Russian Federation**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-0996>, semenova_ll@surgu.ru*

Abstract: this study conducts a comparative analysis of the energy efficiency of LEACH and PEGASIS protocols within the context of their application in geographically distributed wireless sensor networks. The research aims to identify the relationship between protocol selection and network energy efficiency, as well as to determine the impact of these protocols on the lifespan of sensor networks. Simulation results demonstrate that the PEGASIS protocol surpasses LEACH in both parameters, providing longer network operation and improved energy efficiency. Based on the findings, one of the factors for optimal sensor network deployment strategies can be determined, considering their energy characteristics and operational longevity requirements.

Keywords: wireless sensor networks, energy efficiency, data transmission, hierarchical protocols, LEACH protocol, PEGASIS protocol.

Cite this article: Semenova L. L. Comparative Analysis of the Energy Efficiency of Hierarchical Data Transmission Protocols in Geographically Distributed Wireless Sensor Networks. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):54–60. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-07.

*Original article submitted: 14.02.2024.**Revision submitted: 07.03.2024.***Введение**

В современном мире беспроводные сенсорные сети (БСС) занимают ключевое место в технологическом прогрессе, охватывая широкий спектр приложений от мониторинга окружающей среды до сельского хозяйства. Однако, несмотря на достигнутые успехи, существуют проблемы, требующие дальнейшего изучения, в частности, оптимизация энергопотребления и повышение долговечности сети.

Обычно БСС потенциально может включать в себя множество сенсорных узлов, число которых может исчисляться тысячами [1]. Каждый узел беспроводной сети оснащен измерительными датчиками, радиоприемниками, микроконтроллерами, элементами питания и другими необходимыми компонентами.

Процесс передачи информации между узлами БСС происходит посредством радиосвязи. Анализ протоколов передачи данных в рамках БСС подразумевает необходимость применения специализированных методических подходов, обусловленных имеющимися ограничениями и характеристиками этих систем. Особенности конструкции узлов БСС, а также стремление к увеличению продолжительности их работы налагают определенные требования к оптимизации соотношения между возможностями по передаче и энергоэффективностью. В настоящий момент исследования в области БСС в большей степени фокусируются на разработке алгоритмов и протоколов, которые обладают энергетической и вычислительной эффективностью, при этом их применение часто ограничивается основными задачами мониторинга и регистрации данных.

Иерархические протоколы маршрутизации в БСС

Алгоритмы иерархической маршрутизации предполагают самоорганизацию узлов в кластеры, при этом для каждого кластера выбирается назначенный головной узел.

Анализ различных иерархических протоколов маршрутизации, применяемых в БСС, показывает, что основная идея заключается в том, что кластеризация сенсоров и выбор головных кластерных узлов (ГКУ) являются ключевыми стратегиями для оптимизации распределения энергетических ресурсов сети. Протоколы, такие как LEACH, PEGASIS, HEED, TEEN и APTEEN, демонстрируют различные подходы к кластеризации и выбору ГКУ, в частности, протоколы стремятся к балансировке энергетической нагрузки между узлами, использованию остаточной энергии узла как критерия для выбора ГКУ и минимизации энергопотребления за счет эффективной маршрутизации и агрегации данных [2–4].

Протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) инициирует самоорганизацию узлов в кластеры, где узлы назначают себя в качестве ГКУ с определенной вероятностью [5]. Эти ГКУ затем агрегируют и перенаправляют данные от узлов своего кластера на базовую станцию (БС), периодически обновляя ГКУ для равномерного распределения энергетической нагрузки (рис. 1).

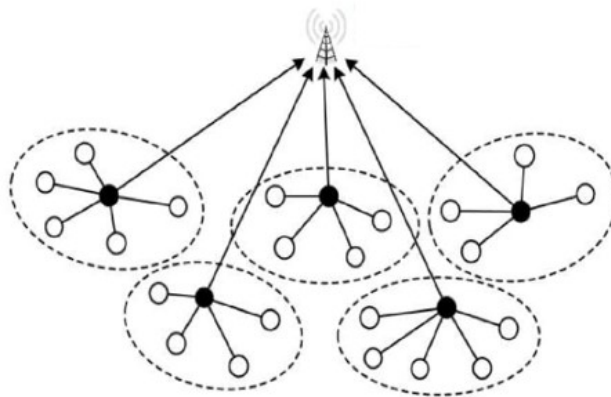


Рис. 1. Организация связи в протоколе LEACH

Каждому из n узлов присваивается случайное значение N от 0 до 1, рассчитывается значение порога $T(n)$:

$$T(n) = \frac{P}{1 - P(r \cdot \text{mod } P^{-1})}, \text{ при } \forall n \in G.$$

$$T(n) = 0, \text{ при } \forall n \notin G,$$

где r — порядок текущего ранга, — вероятность стать головным узлом, n — указатель на текущий узел, G — число узлов, которые не были главными в последних $1/P$ раундах [4].

Узел назначается в качестве главного в кластере на текущий цикл, если его значение меньше заданного порогового значения $T(n)$. После того, как узел получает этот статус, он не может быть повторно выбран для этой роли, пока каждый узел в кластере не исполнит функции главы по крайней

мере один раз. Протокол LEACH предполагает, что каждый узел имеет одинаковую начальную энергию. Следует отметить, что протокол LEACH не обеспечивает оптимального выбора сенсорного узла в качестве ГКУ. Поскольку в алгоритме его работы (рис. 2) отсутствует какой-либо вывод относительно текущей энергии сенсорного узла, элемент кластера с неоптимальными энергетическими характеристиками, но не выбранный в течение длительного периода, может быть назначен в качестве головного узла.

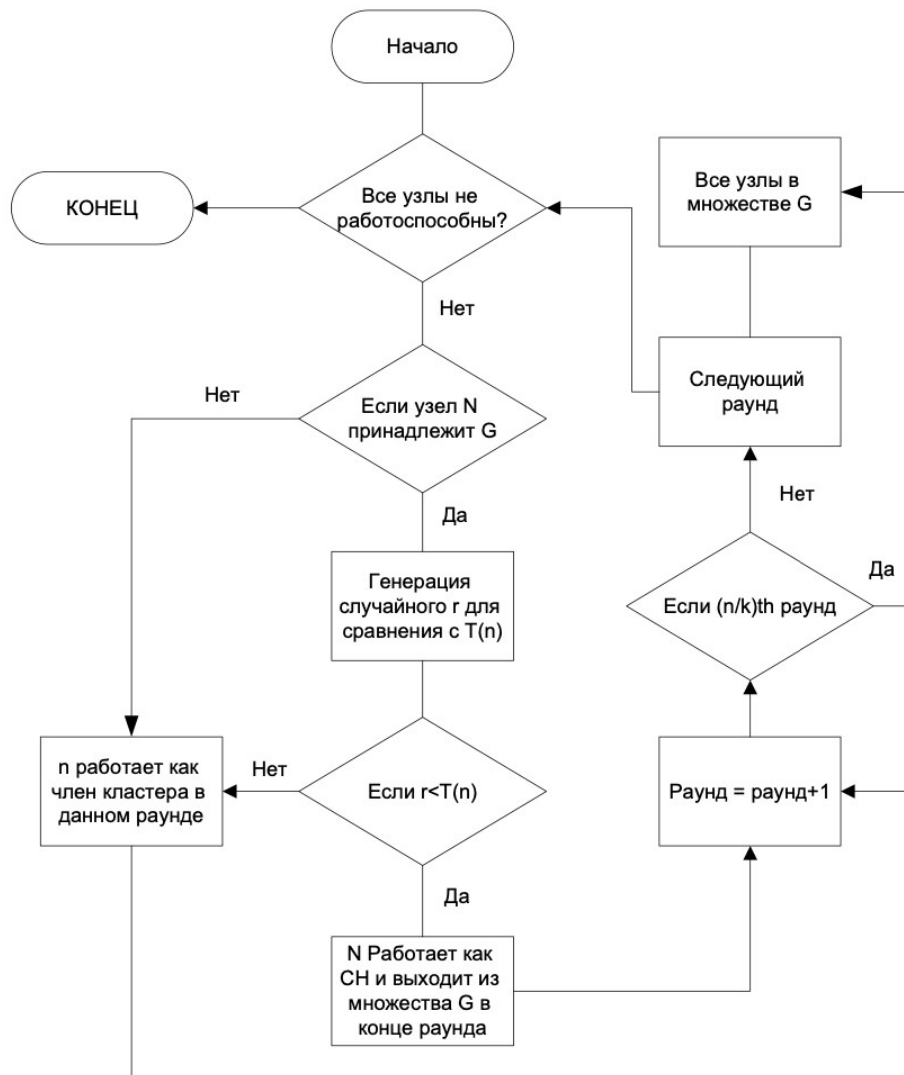


Рис. 2. Блок-схема протокола LEACH

Протокол PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) развивает идею LEACH, формируя цепочки из сенсорных узлов вместо кластеров [6, 7]. В каждой цепочке узлы передают данные соседям с последовательной агрегацией и передачей на БС только одним выбранным узлом, что снижает общее энергопотребление (рис. 3).

В качестве радиомодели используем типовую модель для БСС, приведенную на рисунке 4. Рассматриваемая модель описывается следующими уравнениями:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}k + E_{amp}kd^2,$$

$$E_{RX}(k) = E_{RX-elec}(k) \cdot E_{RX}(k),$$

где E_{TX} — энергия, затрачиваемая на передачу; E_{RX} — энергия, потребляемая при приеме; $E_{TX-elec}$ и $E_{RX-elec}$ — энергии, необходимые для работы электронной схемы передатчика и приемника; E_{amp} — энергия, необходимая для схемы усилителя; k — размер пакета; d — расстояние между передатчиком и приемником [7].

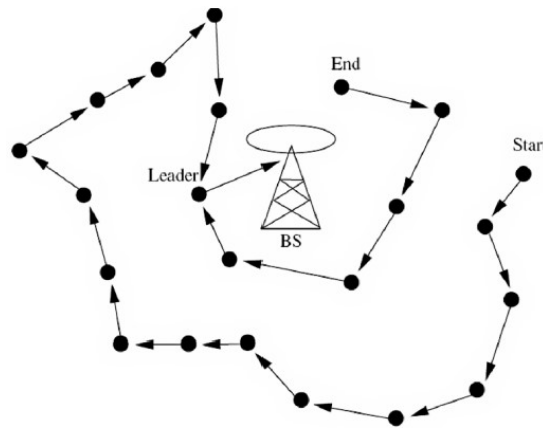


Рис. 3. Организация связи в протоколе PEGASIS

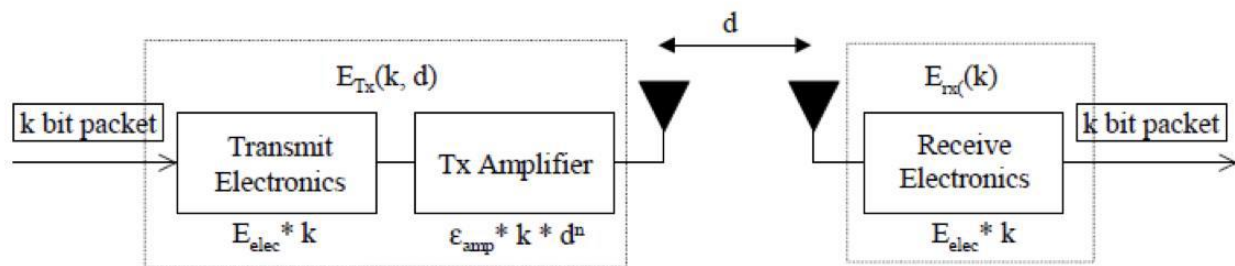


Рис. 4. Радиомодель для БСС [8, с. 3]

Параметры и этапы моделирования

Для оценки характеристик протоколов LEACH и PEGASIS было выполнено моделирование беспроводной распределенной сенсорной сети в программной среде MatLab. Параметры, использованные для моделирования, указаны в таблице 1. Расположение БС определено в центре моделируемой территории. Размер передаваемого сигнала установлен в 4000 бит, в то время как энергетические затраты на агрегацию данных определены в размере 5 нДж/бит. Узел классифицируется как «неработающий», когда его энергетический запас исчерпан до нуля.

Таблица 1

Параметры моделирования БСС

Параметр	Значение	Размерность
Количество сенсоров	800	шт
Размеры поля, где установлены сенсоры (в длину, в ширину)	10000, 200	м
Координаты БС (место расположения)	5000, 100	м
Начальная энергия сенсора	2	Дж
Энергия, затрачиваемая при передаче	50	нДж
Энергия, затрачиваемая для приема	50	нДж
Энергия сбора одного бита данных	5	нДж

На рисунке 5 представлен процесс моделирования работы протокола LEACH (а) и PEGASIS (б). По результатам моделирования на сравнительном графике (рис. 6) можно отметить, что, хотя жизненный цикл системы при использовании протокола PEGASIS составил порядка 650 раундов до полной потери всех окончательных устройств, что меньше, чем у протокола LEACH, у которого осталось 20 работающих сенсоров, все же число работоспособных узлов при PEGASIS примерно в 20–25 раз больше, чем при LEACH, что обеспечивает более равномерную работу системы и более равномерный выход из строя сенсоров.

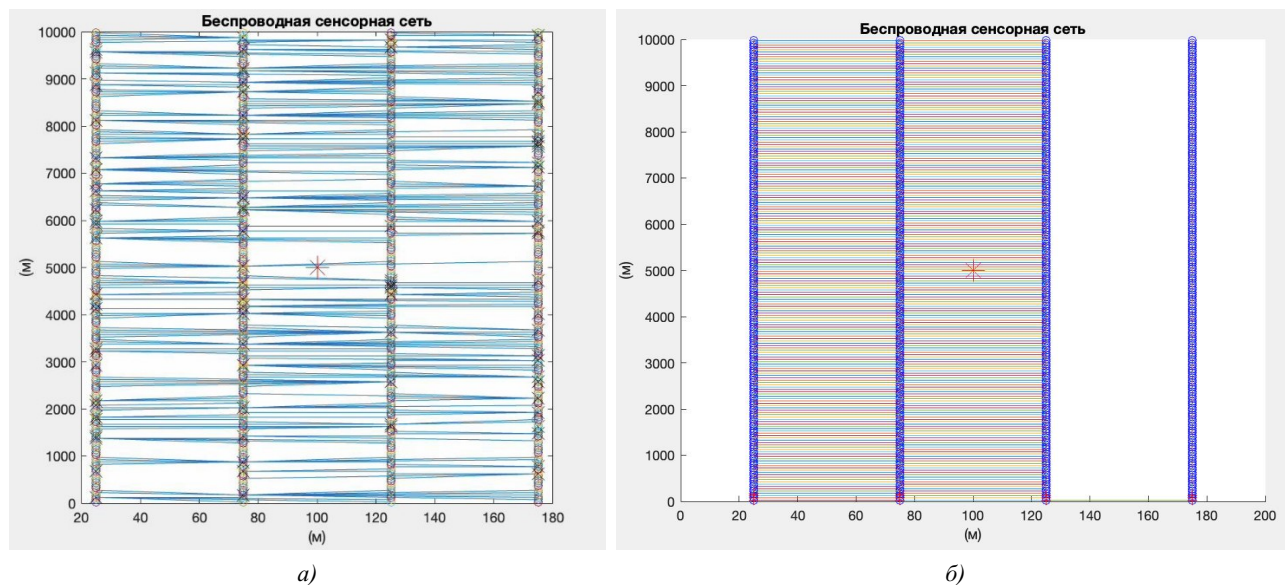


Рис. 5. Процесс моделирования работы протоколов LEACH (а) и PEGASIS (б)

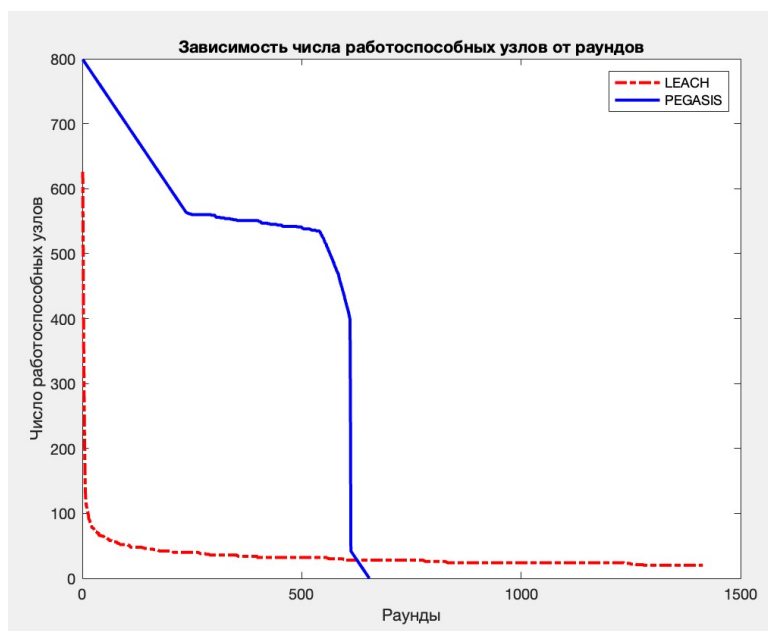


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования для поля размером 200x10000 м

Для анализа работы протоколов уменьшим длину поля с датчиками в два раза и также проведем анализ заданных параметров и работоспособности протоколов при меньшей дальности, энергетические характеристики при этом оставим неизменными.

По результатам моделирования (рис. 7) можем заметить такую же тенденцию, как и на поле длиной 10 километров. В самые первые раунды для протокола LEACH происходит массовая потеря датчиков из-за дальнего расстояния БС, к концу моделирования дееспособными сенсорами остаются те, которые находятся вблизи БС. Для протокола PEGASIS происходит довольно равномерный выход из строя системы, но в данном случае время жизни системы БСС в целом увеличилось более, чем в 2 раза.

Уменьшим длину поля с датчиками еще в два раза, а затем еще в пять раз и также проведем анализ заданных параметров и работоспособности протоколов при меньшей дальности, энергетические характеристики при этом оставим неизменными. Результаты моделирования для поля датчиков размером 200 на 2500 м представлены на рисунке 8(а), для поля размером 200 на 500 м — на рисунке 8(б).

Таблица 2

Параметры моделирования БСС

Параметр	Значение	Размерность
Количество сенсоров	400	шт
Размеры поля, где установлены сенсоры (в длину, в ширину)	5000, 200	м
Координаты БС (место расположения)	2500, 100	м
Начальная энергия сенсора	2	Дж
Энергия, затрачиваемая при передаче	50	нДж
Энергия, затрачиваемая для приема	50	нДж
Энергия сбора одного бита данных	5	нДж

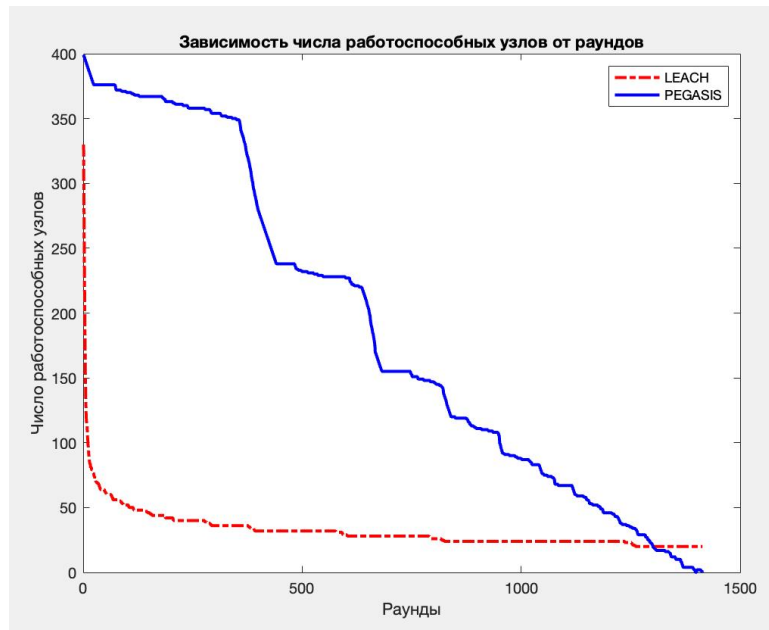
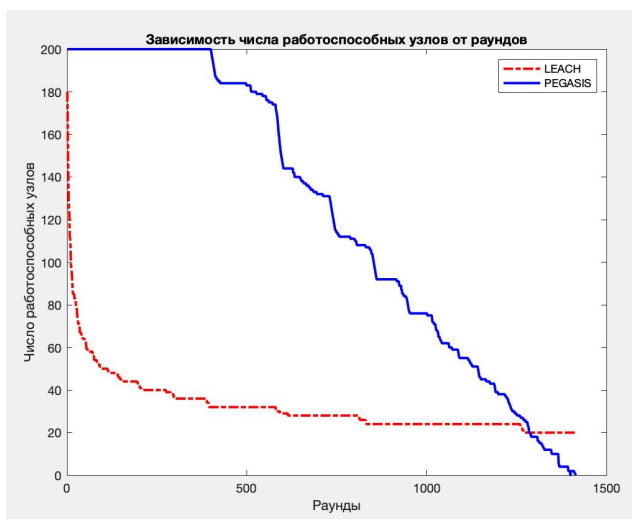
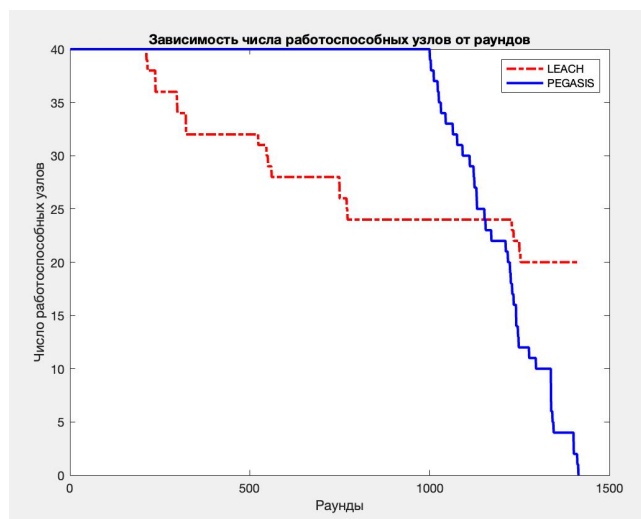


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования для поля размером 200x5000 м



а)



б)

Рис. 8. Сравнение результатов моделирования для: (а) поля размером 200x2500 м; (б) поля размером 200x500 м

На сравнительном графике, представленном на рисунке 8(а), можно отметить, что при использовании протокола LEACH, когда система лишилась уже более двух трети своих сенсоров, датчики при протоколе PEGASIS продолжают свою работу. Для варианта, изображенного на рисунке 8(б), при использовании протокола LEACH время жизни системы БСС в целом дольше, чем у PEGASIS, у которого на 1400 раунде не осталось работающих сенсоров, когда у протокола LEACH их насчитывалось порядка 20 штук. Однако протокол LEACH раньше, чем PEGASIS, стал терять свои датчики, до 1000 раунда система на базе PEGASIS работала без потерь.

Заключение

Таким образом, в ходе моделирования было определено, что протокол LEACH более уместен и эффективен на территориальных участках, площадь которых составляет примерно $0,1 \text{ км}^2$, на примере поля размером $200 \times 500 \text{ м}$. То есть там, где БС будет находиться в более близкой доступности к головным узлам, так как именно на передаче данных от головных узлов до БС происходила наибольшая потеря активных сенсоров из-за необходимости преодоления больших расстояний. Соответственно, в таком случае, чтобы реализовать данный протокол на поле больших размеров, необходимо данную территорию оснащать большим количеством БС, распределенных на участке, то есть, возможно, каждые $0,1 \text{ км}^2$ устанавливать БС, и система будет более эффективно справляться с поставленной задачей.

При этом же протокол PEGASIS продемонстрировал хорошую статистику времени жизни системы. Примечательно, что это устраняет необходимость в дополнительном полевом оборудовании, таком как БС или аналогичные устройства. Это связано с тем, что протокол передачи данных организован через соседние датчики. Следовательно, энергоэффективность повышается даже на значительных расстояниях в результате непосредственной близости узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks. *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*. Hawaii, January, 2000.
2. Махров С. С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: иерархические, основанные на мобильности, мультиориентированные и основанные на гетерогенности. *T-Comm*. 2013;5:44–47. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/protokoly-marshrutizatsii-v-besprovodnyh-sensornyh-setyah-ierarhicheskie-osnovannye-na-mobilnosti-multiorientirovannye-i-osnovannye>.
3. Евстифеева Е. А., Семейкин В. Д. Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики. *Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2018;1:81–89. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-vybora-golovnogo-klasterного-uzla-v-besprovodnoy-sensornoй-seti-na-osnove-nechetkoy-logiki>.
4. Безрук В. М., Власова В. А., Скорик Ю. В. Анализ протоколов маршрутизации беспроводной сенсорно-актуаторной сети и метод их выбора. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017;1:28–32. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-protokolov-marshrutizatsii-besprovodnoy-sensorno-aktuatornoy-seti-i-metod-ih-vybora>.
5. Bao Zhenshan, Xue Bo, Zhang Wenbo. HT-LEACH: An Improved Energy Efficient Algorithm Based on LEACH. *International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*. 2013. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6885155>.
6. Yadav L., Sunitha Ch. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy in Wireless Sensor Network (LEACH). *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2014;5(3).
7. Nadem Q., Javaid N., Mohammad S. Simple: Stable Increased – Throughput Multi-hop Protocol for Link Efficiency in Wireless Body Area Networks. *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA)*. France: Campiegne; 2013. P. 221–226.
8. Heinzelman Rabiner W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsen-Sor Networks. *System Sciences*. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on. IEEE; 2000.
9. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. *Сети связи пост-NGN*. СПб.: БХВ-Петербург; 2014. 160 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИ ПРОВАЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю. Н. Смыков^{1,a}, Е. Ю. Кислицин^{2,b}, М. Н. Иванов^{1,c}

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
^a ✉ sws1007@mail.ru, ^b kislitsin_eu@surgu.ru, ^c nsawt_ese@mail.ru

Аннотация: цель настоящей работы — определение степени влияния кондуктивной электромагнитной помехи (ЭМП) по провалу напряжения на повышение качества функционирования систем электроснабжения. Управление процессами энергосистемы осуществляется на основе учета степени влияния кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения. Особое внимание уделено автономным системам электроснабжения в связи с высокой вероятностью возникновения данной помехи и значительной степенью влияния. Приведена классификация влияния кондуктивной ЭМП по провалу напряжения исходя из динамической устойчивости асинхронных электродвигателей различной установленной мощности. Рассчитаны и приведены графики зависимости времени кондуктивной ЭМП по провалу напряжения как критерия нарушения динамической устойчивости асинхронных электродвигателей различной мощности. Кондуктивная ЭМП по провалу напряжения имеет, как правило, определенную из статистических данных вероятность возникновения, при этом оценка степени влияния помехи на установленное электрооборудование остается актуальной. В данной работе заложены основы анализа необходимости применения помехоподавляющих средств и мероприятий в части рассматриваемой ЭМП, в том числе применение характеристики защиты «время — остаточное напряжение».

Ключевые слова: кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха, электромагнитная совместимость, системы электроснабжения, помехоподавляющие технические средства.

Для цитирования: Смыков Ю. Н., Кислицин Е. Ю., Иванов М. Н. Управление процессами системы электроснабжения силовых электроприемников при провале напряжения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):61–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.

Поступила в редакцию: 23.11.2023.

В окончательном варианте: 10.03.2024.

MANAGING POWER SUPPLY TO ELECTRICAL LOADS VOLTAGE DIP CONDITIONS

Yu. N. Smykov^{1,a}, E. Yu. Kislitsin^{2,b}, M. N. Ivanov^{1,c}

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

² Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ✉ sws1007@mail.ru, ^b kislitsin_eu@surgu.ru, ^c nsawt_ese@mail.ru

Abstract: this study aims to establish a methodology for evaluating the impact of conductive electromagnetic disturbances (EMDs) on voltage dips and their effect on the quality of power supply systems. Special focus is given to standalone power supply systems, which are particularly susceptible to such disturbances due to their higher occurrence rates and significant impact. The research presents a classification for the effects of conductive EMDs on the dynamic stability of asynchronous electric motors, categorized by their power ratings. It includes diagrams illustrating the relationship between the duration of conductive EMDs and voltage dips on the dynamic stability of asynchronous motors of various powers. The probability of conductive EMDs causing voltage dips is usually derived from statistical data. However, evaluating the extent of their impact on installed electrical equipment remains a critical issue. This paper establishes a foundational analysis of the necessity of implementing disturbance mitigation strategies and measures against the considered EMDs. It specifically explores the time vs. residual voltage relationship.

Keywords: conductive low-frequency electromagnetic disturbance, electromagnetic compatibility, electricity system, technical means for disturbance suppression.

Cite this article: Smykov Yu. N., Kislicin E. Yu., Ivanov M. N. Managing Power Supply to Electrical Loads Voltage Dip Conditions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):61–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.

Original article submitted: 23.11.2023.

Revision submitted: 10.03.2024.

Введение

Энергообеспечение — сложная долгосрочная задача с большим количеством значимых факторов. К данным факторам относится повышение качества функционирования систем электроснабжения в условиях сложной электромагнитной обстановки (ЭМО).

На территории России, в условиях удаленного расположения от централизованной энергосистемы, получили широкое распространение автономные системы генерации. В целях оптимальной загрузки и экономической целесообразности на данных энергообъектах мощность подключаемого электрооборудования часто соразмерна с генерируемой. Таким образом, вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения становится выше, например, за счет резкого изменения тока потребления при подключениях. При этом электрическая система в каждом режиме и при переходе от одного режима к другому рассматривается как кибернетическая система, так как имеет характерные признаки:

- наличие цели или алгоритма управления;
- взаимодействия элементов системы с внешней средой, являющейся источником случайных возмущений (толчки нагрузки у потребителей, систематические и несистематические ее изменения, случайные колебания напряжения, атмосферные помехи на линиях передач);
- необходимость отыскания условий оптимальности действия системы;
- управление процессами системы на основе сбора, передачи, приема информации и ее последующей обработки;
- регулирование процессов на основе принципов обратной связи.

Нормы показателей качества электроэнергии в электрических сетях, согласно требованиям ГОСТ 32144-2013, в части указанной помехи [1] характеризуются следующими показателями:

1. Провал напряжения δU_{Π} — ниже 90%.
2. Длительность провала напряжения Δt_{Π} — до 1 мин.

В общем случае в результате провала напряжения (вплоть до нулевого значения) в питающей системе возникает дефицит электроэнергии, величина которого зависит от длительности и глубины провала напряжения. Указанный дефицит энергии появляется непосредственно в агрегатах и механизмах самого технологического процесса. Для описания этого явления можно ввести параметр «энергия провала», которая определяется как объем недополученной энергии за время нарушения работы [2].

Появление данного вида помех имеет различную природу, а именно:

1. Возникновение коротких замыканий.
2. Срабатывание коммутационной и защитной аппаратуры.
3. Действие АПВ.
4. Некорректные схемные решения.
5. Плановые и внеплановые переключения.
6. Подключение электропривода большой мощности.
7. Дефекты электрооборудования и средств автоматики.

При этом в зависимости от структуры системы, разветвленности, генерируемой мощности и т. д. влияние указанной помехи существенно различается. Так, например, общей характеристикой автономных систем электроснабжения является сравнительная близость расположения генераторов к потребителям, или энерго-территориальный охват, поэтому при возникновении данной помехи на все элементы энергосистемы оказывается воздействие ЭМП по провалу напряжения. А именно: происходит снижение момента вращения двигателей, вплоть до остановки электропривода; снижение уровня освещенности, сбой в работе электрооборудования, нарушения цикла работы программируемых логических контроллеров (ПЛК); не корректная работа средств автоматики, снижение КПД электрических машин и т. д. В совокупности возникновение данных помех наносит существенный экономический ущерб. Провалы напряжения длительностью 20–50 мс могут приводить к ущербам в десятки и даже сотни миллионов рублей за одно нарушение [3].

Большое внимание проблеме повышения показателей качества ЭМП по провалу напряжения уделяют и за рубежом. Это вызвано, в том числе, экономическими соображениями. Так, по 25 странам Европейского союза общие потери составляют более 150 млрд евро ежегодно (в 2005–2007 гг.) [4].

Материалы и методы

Согласно [4, 5] положениям национальных нормативно-правовых актов Швеции, предусмотрено разделение ответственности между потребителями и электросетевой компанией в зависимости от класса напряжения питающей сети в соответствии с таблицей 1, где выделяются три области: область I соответствует некритическим провалам напряжения, помехоустойчивость ТС обеспечивается за счет надлежащего их выбора потребителем; область II соответствует критическим провалам напряжения, которые электросетевая компания должна ограничивать исходя из соображений технико-экономической целесообразности; область III соответствует недопустимым критическим провалам напряжения.

Таблица 1

Классификация провалов напряжения в электрических сетях Швеции по признаку разделения ответственности между электросетевыми компаниями и потребителями, для сетей напряжением до 45 кВ включительно

$U_{ocm} \%$	Длительность провала напряжения Δt_{np} , с				
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$	$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$	$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$
$90 > U_{ocm} > 85$	I				
$85 > U_{ocm} > 70$					
$70 > U_{ocm} > 40$			II		
$40 > U_{ocm} > 10$					
$10 > U_{ocm} > 0$					III

Исходя из указанных выше предпосылок и широкой практики применения в автономных системах электроснабжения газопоршневых электростанций (ГПЭС), которые обладают меньшей динамической и статической устойчивостью по сравнению с дизель-генераторными установками, вопросы обеспечения высоких показателей качества в части кондуктивной ЭМП по провалу напряжения являются актуальными. Степень влияния данной помехи с учетом индивидуальных энергетических и технических показателей установленного оборудования, наряду с вероятностью возникновения помехи, являются базовыми факторами разработки технических мероприятий и помехоподавляющих средств. Ввиду повсеместного применения асинхронного электродвигателя, наибольший интерес представляет выявление границы восприимчивости данной электрической машины к ЭМП по провалу напряжения с целью повышения качества функционирования автономной системы электроснабжения.

При номинальном напряжении значение максимальной мощности превышает номинальную мощность практически вдвое. С уменьшением напряжения в питающей сети значение опрокидывающего момента (максимальной мощности) резко снижается (см. рис. 1).

Максимальный момент прямо пропорционален квадрату напряжения [6]:

$$M_{\max} = \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot \omega_c \cdot C_1 \cdot (x_1 + C_1 x'_2)}, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов, m_1 — количество фаз питающего напряжения, ω_c — угловая скорость поля, x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора, x'_2 — приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

$$C_1 = \frac{r_1 \cdot r_{12} + x_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 \cdot x_{12}^2}. \quad (2)$$

В двигателях общего назначения $C_1 \approx 1,02 \div 1,06$.

При уменьшении напряжения потребляемая реактивная мощность нагрузки снижается. Однако при больших снижениях напряжения реактивная мощность увеличивается из-за останова не отключившихся от сети асинхронных двигателей. При отключении двигателя с заторможенным ротором

возникают значительные перенапряжения до $5U_{\phi}$, так как при работе двигателя в его индуктивности рассеяния запасается магнитная энергия [7].

$$W_M = \frac{L_s}{2} \cdot i_{cp}^2, \quad (3)$$

где L_s — индуктивность рассеяния двигателя, i_{cp} — ток среза.

Поскольку электродвигатель под воздействием тормозного момента механизма и значительного снижения вращающего момента будет снижать частоту вращения, при этом возможно появление (при значительном снижении скорости вращения) отрицательного избыточного момента. В результате при окончании провала напряжения возможно «опрокидывание», или нарушение динамической устойчивости асинхронного электродвигателя.

Следует отметить, что при снижении частоты вращения изменяется индуктивное сопротивление обмотки ротора, а значит, коэффициент мощности данной машины снижается, происходит увеличение тока статора, что, в свою очередь, вызывает повышенное падение напряжения на элементах сети и снижение питающего напряжения на выводах электрической машины.

За основу исследования принимаем, что кондуктивную низкочастотную ЭМП по провалу напряжения, согласно нормативным документам, подразделяют на 6 групп, исходя из длительности данной помехи, и 5 подгрупп, исходя из глубины провала напряжения. Проведем классификацию влияний на динамическую устойчивость асинхронного электродвигателя, включающую в себя показатели по длительности и глубине провала напряжения в соответствии с указанными в нормативных документах (ГОСТ 32144-2013).

Оценка условий динамической устойчивости асинхронного электродвигателя при помощи уравнения динамического равновесия асинхронной машины [8]:

$$T_j \frac{dn}{dt} = \frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}} \cdot \frac{dn}{dt} = m_{\partial} - m_m, \quad (4)$$

$$T_j = \frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}}, \quad (5)$$

где $G \cdot D_{\Sigma}^2$ — суммарный маховый момент электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $P_{ном}$ — номинальная мощность электродвигателя, МВт; n_c — синхронная частота вращения двигателя, о. е.; m_{∂} — вращающий момент двигателя, о. е.; m_m — тормозной момент механизма, о. е.

Затормаживание электродвигателя разнородно и происходит в зависимости от ряда индивидуальных особенностей и характеристик механизма. В первую очередь, это момент инерции, тип механизма, например, компрессор или центробежный насос, коэффициент полезного действия и т. д.

Для центробежных механизмов тормозной момент пропорционален квадрату скорости вращения, обозначен красной кривой на рисунке 1, поэтому данный электропривод имеет более высокую динамическую устойчивость.

На рисунке 1 оранжевой прямой соответствует нагрузка, которая не зависит от частоты вращения, I — обозначена механическая характеристика, соответствующая окончанию действия кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения ($U > 0,9U_{ном}$), II — механическая характеристика, соответствующая работе электродвигателя при сниженном напряжении, III — механическая характеристика, соответствующая работе электродвигателя при значительном снижении напряжения питания, причем $M_{\partial} < M_{мех}$ (M_{∂} — вращающий момент, развиваемый электродвигателем, $M_{мех}$ — тормозной момент, создаваемый механизмом).

Как видно из рисунка 1, при значительном провале напряжения и критической длительности провала скорость вращения снизится до значения n_2 , а это скорость вращения электродвигателя, после снижения которой электродвигатель не сохраняет динамическую устойчивость (возникает отрицательный момент ΔM).

Исходя из наиболее негативного сценария, принимаем тормозной момент механизма постоянным и равным 1 о. е (оранжевая линия на рисунке 1), а провал напряжения — симметричным.

$$\frac{G \cdot D_{\Sigma}^2 \cdot n_c^2}{365 \cdot P_{ном}} \cdot \frac{dn}{dt} = m'_{\partial} - 1, \quad (6)$$

где m'_{∂} — вращающий момент двигателя с учетом снижения напряжения питания, см. рисунок 1.

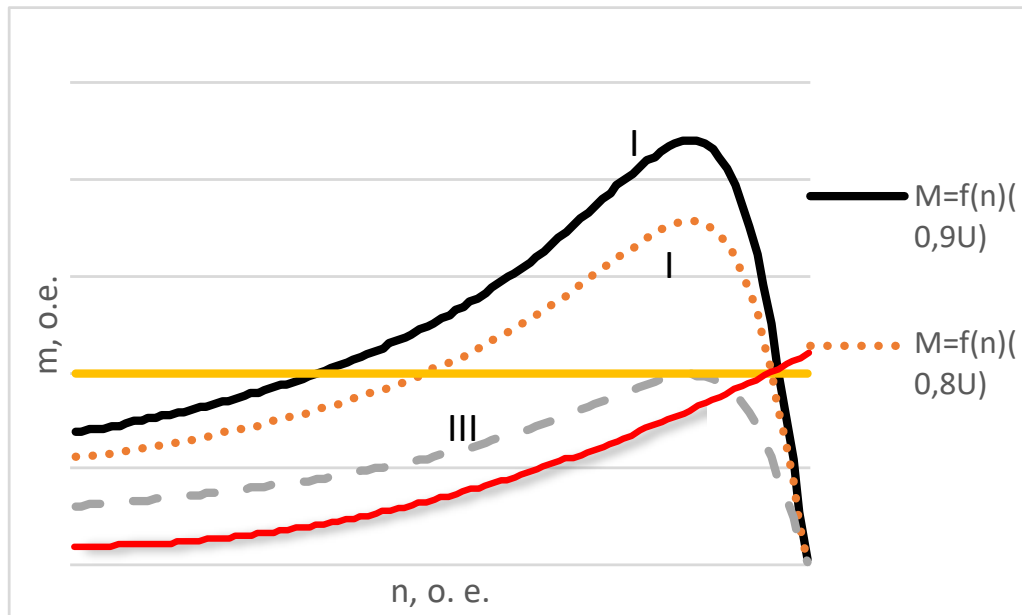


Рис. 1. Влияние кондуктивной ЭМП по провалу напряжения на механическую характеристику асинхронного электродвигателя

Используя справочные данные, таблицу 2 и формулу 6, определяем время критическое, после которого происходит опрокидывание асинхронной машины. Полученные данные обозначены как: уст. — обладает динамической устойчивостью в условиях конкретизированной кондуктивной ЭМП по провалу напряжения; не уст. — не обладает динамической устойчивостью в условиях конкретизированной кондуктивной ЭМП по провалу напряжения.

Таблица 2

Справочные данные

№	Тип двигателя	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	η	$\cos \varphi$	$X_m, о. е.$	$R_1, о. е.$	$X_1, о. е.$	$T_j, рад$
1	4A100S2Y3	380	4,0	0,86	0,88	2,5	0,046	0,058	60
2	4A100L2E3	380	5,5	0,87	0,91	3,0	0,050	0,054	80
3	4A132M2Y3	380	11,0	0,88	0,90	3,8	0,040	0,061	90
4	4A160M2Y3	380	18,5	0,88	0,92	4,0	0,049	0,092	90
5	4A180M2Y3	380	30,0	0,90	0,90	3,8	0,030	0,073	110
6	4A225M2Y3	380	55,0	0,91	0,90	4,4	0,026	0,092	150
7	4A250S2Y3	380	75,0	0,91	0,89	4,6	0,021	0,080	150
8	4A250M2Y3	380	90,0	0,92	0,90	4,2	0,020	0,078	150

С целью обеспечения наглядности процессов данные по ряду электродвигателей от 4 до 90 кВт сведены и представлены на рисунке 2.

На основе полученных данных, а также практического опыта эксплуатации электрооборудования и средств автоматики, представляет высокий технико-экономический интерес применение защиты «время — остаточное напряжение» с динамической уставкой по времени срабатывания. Рассмотрим на примере модернизации защиты от обрыва фазы и пониженного напряжения при электроснабжении судов от береговых источников питания. Так как заранее не известны характерные особенности электрических сетей в части качества электрической энергии в различных портах, то вопрос обеспечения автоматического изменения уставки, в том числе по времени провала напряжения, позволит производить переключение с одного источника электрической энергии на другой с минимальными технологи-

Таблица 3

Классификация влияния на динамическую устойчивость электропривода с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 5,5 кВт

$U_{ocm}\%$	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_{np} , с							
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$		$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$		$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$
$90 > U_{ocm} > 85$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$85 > U_{ocm} > 70$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$70 > U_{ocm} > 40$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,23с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,15с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$40 > U_{ocm} > 10$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,15с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,13с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$10 > U_{ocm} > 5$	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,13с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.

Таблица 4

Классификация влияния на динамическую устойчивость электропривода с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 90 кВт

$U_{ocm}\%$	Длительность провала (прерывания) напряжения Δt_{np} , с							
	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$		$0,2 < \Delta t_{np} \leq 0,50$		$0,5 < \Delta t_{np} \leq 1$	$1 < \Delta t_{np} \leq 5$	$5 < \Delta t_{np} \leq 20$	$0,01 < \Delta t_{np} \leq 0,2$
$90 > U_{ocm} > 85$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$85 > U_{ocm} > 70$	уст.		уст.		уст.	уст.	уст.	уст.
$70 > U_{ocm} > 40$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	уст. $U_{ocm} = 70$ $t_{кр} = 0,45с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$40 > U_{ocm} > 10$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	уст. $U_{ocm} = 40$ $t_{кр} = 0,3с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.
$10 > U_{ocm} > 5$	уст. $U_{ocm} = 10$ $t_{кр} = 0,25с$	уст. $U_{ocm} = 5$ $t_{кр} = 0,24с$	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.	не уст.

ческими и экономическими издержками.

При этом уставку по времени отключения судовой электроэнергетической системы от берегово-

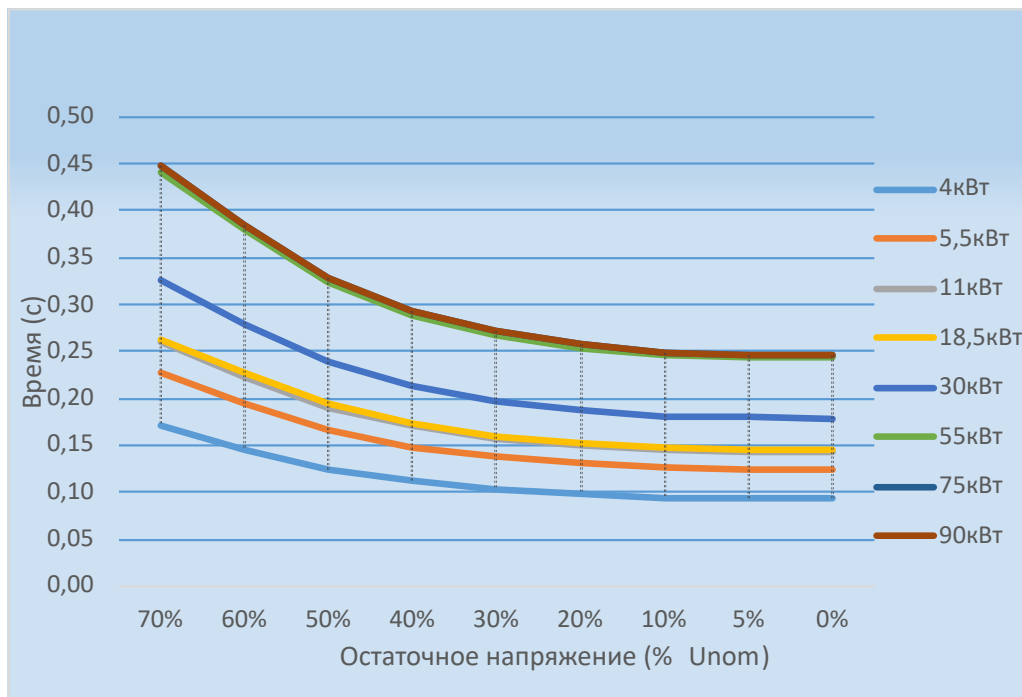


Рис. 2. Определение времени кондуктивной ЭМП по провалу напряжения как критерия нарушения динамической устойчивости асинхронного электродвигателя
Примечание: составлено авторами

го электроснабжения при возникновении кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения необходимо автоматически изменять в зависимости от ряда факторов:

- коэффициент загрузки судовых электроприводов (определение коэффициента загрузки в зависимости от разницы коэффициента мощности, типового для данного проекта, и текущего коэффициента мощности);
- несимметрия напряжения, чем больше значение несимметрии напряжения питания, тем меньше уставка по времени отключения при возникновении провала напряжения;
- коэффициент мощности;
- уровень провала напряжения;
- время с момента предыдущего провала;
- математическое ожидание провала напряжения;
- вероятность возникновения провала напряжения.

Результаты и их обсуждение

В условиях вероятностного возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения данная классификация позволяет выявить востребованность технических мероприятий и средств по подавлению указанной помехи. Прослеживается взаимосвязь с иностранными источниками, а именно, классификация провалов напряжения в электрических сетях Швеции по признаку разделения ответственности между электросетевыми компаниями и потребителями, для сетей напряжением до 45 кВ включительно (см. табл. 1). Полученные данные позволяют обеспечить технико-экономическое обоснование, проектирование и применение мероприятий и средств подавления кондуктивной ЭМП по провалу напряжения, например, «система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [9], что, в свою очередь, значительно снизит издержки, вызванные нарушениями технологического процесса, хранения и обработки данных, повысит надежность и качество функционирования электрооборудования и средств автоматики. Результаты работы послужили основой для обоснования и создания характеристики защиты «время – остаточное напряжение» с использованием динамической уставки по времени срабатывания. С целью обеспечения физической основы указанной защиты, полученные математические расчеты заложены в алгоритм работы программы программируемого логического контроллера ПЛК 110-24.30.Р-М (фирма-производитель «Овен»). Программа выполнена в среде

разработки CoDeSys Version 2.3.9.41 на языке непрерывных функциональных схем CFC. Полученная программа органически вливается и дополняет сценарии использования **Smart Grid** («интеллектуальные сети электроснабжения»), позволяет расширить спектр решаемых задач и обеспечить высокие показатели энергоэффективности и энергосбережения.

Заключение

Оценка электромагнитной обстановки и повышение электромагнитной совместимости технических средств в части указанной помехи ведут к повышению срока службы электрооборудования и качества функционирования системы электроснабжения в целом. С другой стороны, оценка степени влияния кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения является основой для формирования принципов работы защиты от обрыва фазы и провала напряжения, с учетом характеристики «время – остаточное напряжение». Указанная характеристика, в свою очередь, позволяет обеспечить автоматическое изменение уставки (динамическую уставку) при переходе с одного источника питания на другой в условиях возникновения кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения. При этом для обоснования перехода с одного источника питания на другой учитывается остаточное напряжение и дополнительные факторы, такие как: несимметрия, коэффициент мощности и другие (указаны выше).

Дальнейшие исследования направлены на уточненный анализ влияния дополнительных факторов на характеристику защиты «время — остаточное напряжение».

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. *Стандартинформ*. 2014;1:10–14.
2. Низамов И. И., Васильев Ю. А., Матухин В. Л. Общие условия влияния провалов напряжения на работу промышленных потребителей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2011;9:183–185.
3. Ершов С. В., Пигалов М. С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017;12(1):95–104.
4. Солодовников В. Е., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. Методика обработки статистической информации о провалах и кратковременных прерываниях напряжения в электрических сетях. *Электричество*. 2019;1(4):4–16.
5. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. *Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168*. Режим доступа: <https://cired.net/publications/cired2011>.
6. Копылов И. П. *Электрические машины*. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат; 1986. 360 с.
7. Шидловский А. К., Пивняк Г. Г. Электромагнитная совместимость потребителей. *Машиностроение*. 2012;2:183–192.
8. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. *Устойчивость энергосистем*. Монография. Кн. 1. СПб.: Издательство НОУ «Центр подготовки кадров энергетики»; 2006. 369 с.
9. Переладов М. Е., Смыков Ю. Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 2022;1. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47784413_27547585.PDF.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-09

СОПРОВОЖДЕНИЕ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ В ПЕРИОД АМБУЛАТОРНОГО ЛЕЧЕНИЯ

В. Б. Тютюнник^{1,a}, Р. С. Сазиков^{2,b}, Э. Г. Тунян^{1,c}, Л. Г. Ключ^{3,d}

¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

² Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация

³ Сургутская клиническая травматологическая больница, г. Сургут, Российская Федерация

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3180-5367>, vari0200@yandex.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0078-0013>, sazikov@edro.su

^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3260-1310>, tunyan@edro.su

^d ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4430-2902>, lidia.klyus@mail.ru

Аннотация: исследование фокусируется на анализе проблематики амбулаторного наблюдения за неврологическими пациентами, подчеркивая трудности, возникающие при долгосрочном мониторинге и обмене информацией между пациентом и лечащим врачом. Особое внимание уделено промежуткам времени между визитами к специалисту, так называемому «темному периоду», который может способствовать ряду проблем, негативно сказывающихся на эффективности терапии и благополучии пациента. В работе обозначены недостатки привычных методик и предложены новаторские решения, включая применение телемедицины и мобильных приложений, целью которых является усовершенствование ухода и улучшение мониторинга состояния больных. Анализируется использование смартфонов с многочисленными датчиками для сбора актуальных данных о здоровье пациента и их последующей передачи медицинским работникам для получения всесторонней клинической картины. Несмотря на отсутствие готовой специализированной платформы, рассмотрение и потенциальное использование существующих технологических решений открывает значительные перспективы для оптимизации лечебного процесса и минимизации рисков, ассоциированных с неврологическими расстройствами.

Ключевые слова: неврологические заболевания, амбулаторное сопровождение, телемедицина, мобильные приложения, мониторинг состояния, информационные технологии в медицине, долгосрочное наблюдение, инновационные методы, качество жизни пациентов.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Для цитирования: Тютюнник В. Б., Сазиков Р. С., Тунян Э. Г., Ключ Л. Г. Сопровождение неврологических пациентов в период амбулаторного лечения. *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):69–81. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-09.

Поступила в редакцию: 01.02.2024.

В окончательном варианте: 28.02.2024.

FOLLOW-UP CARE FOR NEUROLOGICAL OUTPATIENTS

V. B. Tyutyunnik^{1,a}, R. S. Sazikov^{2,b}, E. G. Tunyan^{1,c}, L. G. Klus^{3,d}

¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation

² Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation

³ Surgut Traumatology Hospital, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3180-5367>, vari0200@yandex.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0078-0013>, sazikov@edro.su

^c ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3260-1310>, tunyan@edro.su

^d ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4430-2902>, lidia.klyus@mail.ru

Abstract: this study investigates the challenges associated with outpatient care for neurological patients, with a particular focus on the obstacles encountered in long-term management and communication between patients and their healthcare providers. It highlights the "dark period" between specialist visits, a time that may lead to various issues adversely affecting the efficacy of treatments and patient health. The research critiques traditional approaches and introduces innovative strategies for enhancing care and continuous patient observation. These include leveraging telemedicine and mobile technologies for better care delivery and utilizing smartphones with integrated sensors to collect and transmit real-time health data to medical professionals, thereby offering a more complete clinical overview. The paper concludes by noting the current lack of a dedicated platform but underscores the promising potential of existing solutions to improve therapeutic outcomes and reduce the risks associated with neurological conditions.

Keywords: neurological disorders, outpatient care, telemedicine, mobile applications, health monitoring, IT for medicine, long-term observation, innovative methods, patient quality of life.

Acknowledgements: this study is a part of the FNEF-2024-0001 government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, project No. 1023032100070-3-1.2.1 Development and Implementation of Trusted Artificial Intelligence Systems Based on new Mathematical Methods and Algorithms, Fast Computing Models for Domestic Computing Systems.

Cite this article: Tyutyunnik V. B., Sazikov R. S., Tunyan E. G., Klus L. G. Follow-Up Care for Neurological Outpatients. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):69–81. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-09.

Original article submitted: 01.02.2024.

Revision submitted: 28.02.2024.

Введение

В современном мире неврологические заболевания занимают ведущее место среди причин инвалидности и снижения качества жизни населения по всему миру. По данным Всемирной организации здравоохранения, они являются причиной почти 10 % случаев инвалидности, что делает вопросы улучшения диагностики, лечения и ухода за такими пациентами особенно актуальными. Особенности неврологических патологий, такие как многообразие клинических проявлений, необходимость длительного и иногда пожизненного наблюдения и лечения, делают задачу организации эффективного медицинского сопровождения крайне сложной.

В контексте медицинского ухода, так же, как и во многих других областях, регулирование ключевых параметров лечения играет решающую роль в достижении его оптимальных исходов. Для иллюстрации можно привести аналогию с авиацией, где для безопасного и эффективного перемещения из пункта А в пункт Б пилот должен непрерывно мониторить и корректировать множество параметров полета. Так же в стационаре врач имеет возможность непрерывного наблюдения за состоянием пациента, что позволяет ему оперативно корректировать стратегию лечения при изменении состояния. В период прохождения амбулаторного лечения существует так называемая «темная зона», когда нет мониторинга состояния здоровья пациента со стороны врача. Интервал времени Δt (рис. 1) отображает, когда пациент находился на лечении без мониторинга за его состоянием. В течение времени Δt у больных могут проявляться новые признаки болезни, ухудшение состояния или побочные эффекты от препаратов, о которых врачи обычно узнают только после приема пациента. Если приемы пациента нечастые, это может затянуть процесс поиска и выбора подходящего лечения и замедлить процесс реабилитации.

Современные технологии, такие как телемедицина и мобильные приложения, предоставляют новые возможности для улучшения контроля за заболеванием и повышения эффективности лечения. Информационные системы, предназначенные для мониторинга состояния пациентов, напоминания о приеме лекарств, записи на консультации и общения с лечащим врачом, могут значительно помочь в этом процессе.

Отсюда можно сделать вывод, что создание и применение новых методов для сопровождения пациентов с неврологическими заболеваниями в период амбулаторного лечения не только соответствуют современным требованиям медицинской науки и практики, но и являются важным шагом для улучшения качества и доступности медицинской помощи для пациентов с неврологическими заболеваниями.

В статье рассматривается проблема мониторинга с применением современных информационных систем для сопровождения пациентов с неврологическими заболеваниями в период амбулаторного



Рис. 1. Классическая схема сопровождения пациента во время амбулаторного лечения

лечения. Цель — поиск лучших практик и совмещение с современными информационными системами для упрощения медицинским работникам процесса сопровождения пациентов.

На сегодняшний день все мировое медицинское сообщество нацелено на разработку и внедрение результатов технологического прогресса, способных оказать помощь в решении медицинских вопросов как со стороны пациента, так и со стороны всего медицинского персонала.

Конкретные цели данного исследования включают в себя:

- анализ проблем и «белых пятен», существующих на данный момент в российской системе первичного медицинского звена, в частности, в амбулаторной помощи пациентам неврологического профиля, включая также выявление слабых мест для пациента и медицинских работников в период лечения и наблюдения;
- обзор уже существующих и используемых информационных технологий, включая телемедицину, мобильные приложения и другие цифровые инновации в медицинской практике;
- выдвижение предложений по внедрению и использованию информационных систем и технологий для отслеживания состояния и поддержки неврологических больных амбулаторного профиля, которые включают в себя оценку потенциальной эффективности, доступности и удобства использования предлагаемых вариантов решения;
- выдвижение гипотез о возможных вариантах улучшения ухода за пациентами неврологического профиля с помощью инновационных технологий и определение возможных направлений исследования в данной области;
- улучшение качества жизни и устранение проблем, связанных с назначенной терапией, путем более эффективного и оперативного медицинского сопровождения неврологических больных;
- развитие целостной системы ухода, соответствующей действующим стандартам российской системы здравоохранения, целью которой является улучшение самой системы амбулаторного сопровождения пациентов неврологического профиля.

Материалы и методы

Основная проблема современного здравоохранения, связанная с диагностикой, мониторингом и корректировкой лечения в период долгосрочного амбулаторного лечения пациента, возникает в связи с отсутствием непрерывного контроля над пациентом, что позволило бы оперативно скорректировать план его лечения. Проблема возникает из-за большого интервала между визитами к неврологу. Пациент, находясь дома, порой может столкнуться с трудностями, связанными с самодиагностикой, ухудшением состояния на фоне терапии вследствие ее неэффективности или проявления побочных действий, а также несвоевременного выполнения назначений врача, что может повысить риск ухудшения состояния.

Также низкий уровень знаний патоморфологии, развития и течения заболевания со стороны пациента может негативно повлиять на его активное участие в процессе лечения и реабилитации. Снижение эффективности лечебного плана и замедление процесса восстановления может быть связано, кроме того, с высокой стоимостью терапии, сложностями транспортировки и недоступностью медицинских услуг в отдаленных регионах. Все эти факторы могут стать проблемой непрерывного медицинского наблюдения.

Современные технологии и телемедицина предоставляют возможность преодоления многих барьеров и закрытия многих пробелов, связанных с неврологическими заболеваниями. Однако не все существующие решения адаптированы к особенностям этих заболеваний или доступны для всех пациентов из-за высокой стоимости и сложности применения. Поэтому необходимо разработать новые, более доступные и удобные инструменты для удаленного мониторинга и управления состоянием пациентов, что значительно улучшит их качество жизни и процесс лечения. В ходе исследования будут рассмотрены неврологические пациенты, которые находятся на амбулаторном лечении.

Исследование будет посвящено методам и алгоритмам сопровождения амбулаторных неврологических пациентов, направленным на оптимизацию ухода, контроль состояния, улучшение качества жизни и предотвращение осложнений, возникающих вследствие самого заболевания, назначенной терапии в виде ее побочного действия или аллергических реакций и др.

В процессе данного исследования проанализированы внедренные и используемые по сегодняшний день информационные системы и технологии для наблюдения, контроля и управления состоянием больных с неврологическими, эндокринными и сердечно-сосудистыми заболеваниями. Особое внимание было уделено инновационным подходам к разработке и внедрению информационных систем, дистанционному наблюдению для сопровождения пациентов с эпилепсией, сахарным диабетом и многими отслеживаемыми сердечно-сосудистыми заболеваниями.

В ходе исследования был произведен анализ программного продукта ÉPI-TAVIE, который помогает улучшить навыки самоконтроля для пациентов с эпилепсией. Это еще раз показывает перспективность применения информационных технологий в уходе за пациентами с эпилепсией [1]. Были также изучены все возможности современных методов и инструментов для мониторинга и реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, в том числе применение современных устройств и информационных систем для контроля за состоянием пациентов в период реабилитации [2].

Особое внимание в исследовании было уделено анализу алгоритма работы системы дистанционного мониторинга, представленного в работе А. Н. Осипова с соавторами. Авторы подчеркивают необходимость разработки избыточных алгоритмов функционирования для обеспечения устойчивости системы мониторинга к ошибкам, а также обеспечения требуемой диагностической достоверности без существенного увеличения энергопотребления и сокращения длительности автономной работы носимых блоков [3].

Исследование позволяет сделать вывод о том, что информационные технологии и системы, используемые в медицинской практике, помогают решить проблемы разного уровня, от глобальных — повышение смертности, инвалидизации и других не менее значимых, до более индивидуальных — повышение качества жизни пациента, сохранение трудоспособности, благодаря улучшению качества мониторинга и своевременной корректировке состояния пациентов неврологического, эндокринологического и сердечно-сосудистого профилей. Также они способствуют реализации федерального проекта «Развитие сети национальных медицинских исследовательских центров и внедрение инновационных медицинских технологий» в рамках национального проекта «Здравоохранение».

На данный момент врачи-неврологи используют четыре группы решений для сопровождения пациентов в период лечения первичным медицинским звеном: телемедицина, EMR, приложения для управления заболеваниями и платформы для конференций. Они способствуют решению серьезных вопросов, связанных с местом жительства и материальным положением пациентов, а также проблем, связанных с состоянием больных. Результаты анализа этих решений представлены на рисунке 2.

На сегодняшний день существуют телемедицинские сервисы, такие как Doxy.me [4], eVisit [5], Mend [6], позволяющие докторам и пациентам общаться на больших расстояниях, что может быть полезно неврологическим больным во время амбулаторного лечения. Также есть системы электронных медицинских записей (EMR), такие как Epic [7], Cerne [8], которые позволяют врачам хранить медицинскую информацию пациентов и управлять ею, что может быть полезно для отслеживания прогресса

пациента во время амбулаторного лечения.

Приложения для управления заболеваниями Medisafe [9], MyTherapy [10] помогают пациентам управлять своими заболеваниями, отслеживать симптомы и придерживаться рекомендаций по лечению.

Платформы для видеоконференций Zoom [11], Google Meet [12], Microsoft Teams [13], Skype [14], Discord [15] могут быть использованы для проведения виртуальных консультаций с пациентами.

На основе анализа существующих подходов было предложено новое решение, которое называется «ЕДРО Невроконтроль». Оно предназначено для улучшения процесса амбулаторного сопровождения неврологических пациентов.

«ЕДРО Невроконтроль» выделяется среди аналогов, таких как телемедицинские сервисы Doxy.me, eVisit, Mend, системы электронных медицинских записей (EMR), вроде Epic и Cerner [16], приложения для управления заболеваниями, например, Medisafe и MyTherapy, а также платформы для видеоконференций типа Zoom, Google Meet, Microsoft Teams, Skype и Discord, благодаря своему интегрированному подходу. «ЕДРО Невроконтроль» объединяет все эти функции в одном ресурсе, обеспечивая взаимодействие между различными аспектами ухода за пациентами и упрощая процесс управления лечением и общения как для врачей, так и для пациентов. Для неврологических пациентов созданы специальные функции, включая индивидуальные алгоритмы мониторинга и инструменты для отслеживания конкретных симптомов, которым уделяется особое внимание. Алгоритмы искусственного интеллекта, обладающие продвинутыми возможностями, проводят анализ медицинских данных, обеспечивая глубокое и точное понимание состояния пациента. Платформа «ЕДРО Невроконтроль» обладает интуитивно понятным и легким в использовании пользовательским интерфейсом, что имеет особое значение для неврологических пациентов, которые могут испытывать сложности при работе с традиционными цифровыми технологиями.

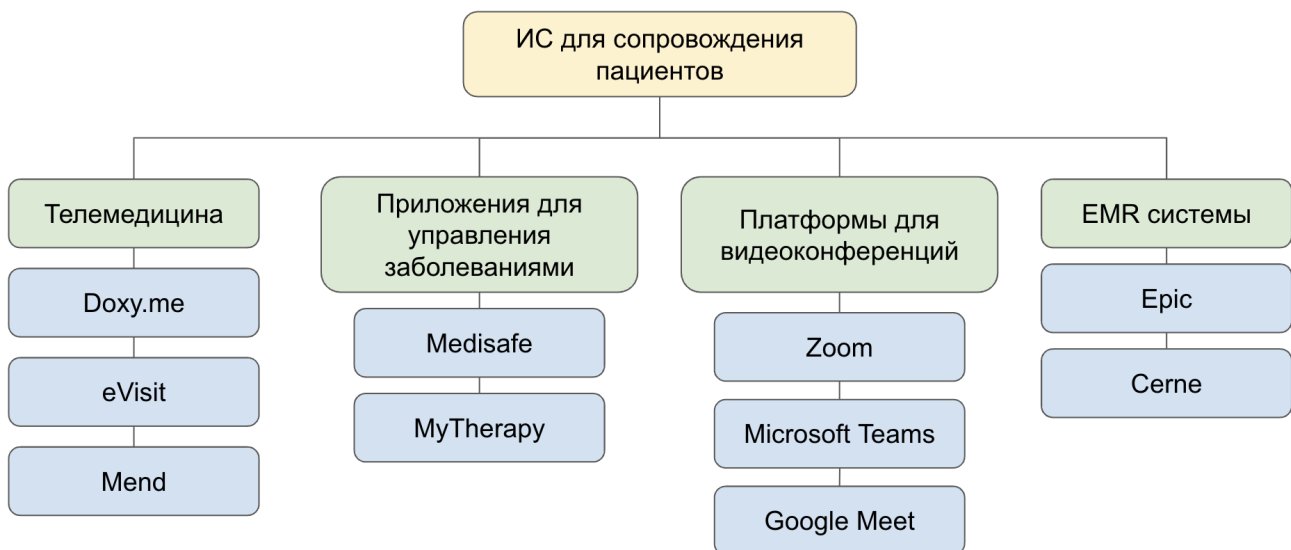


Рис. 2. Информационные системы сопровождения пациентов

Результаты и их обсуждение

Внедрение информационных систем в неврологическую практику предоставляет новые возможности для улучшения качества медицинского обслуживания и эффективности терапии. С развитием цифровых технологий и расширением их функциональности медицинская сфера получает уникальные инструменты, способные значительно облегчить процесс сопровождения пациентов на амбулаторном этапе. Особенно это актуально в области неврологии, где длительное наблюдение и мониторинг состояния пациентов играют ключевую роль в успешном лечении и профилактике осложнений. В данной статье представлены конкретные примеры, демонстрирующие потенциал информационных систем в сопровождении неврологических пациентов, что позволяет нам более глубоко понять их влияние на процесс лечения и перспективы дальнейшего развития.

Приведем пример адаптации пациента с хроническим неврологическим заболеванием. Пациент с хроническим неврологическим заболеванием (рис. 3, 4), таким как рассеянный склероз, обычно регулярно посещает врача для мониторинга своего состояния и корректировки лечения. Однако с появлением «ЕДРО Невроконтроль», платформы, которая позволяет отслеживать ключевые показатели здоровья в режиме реального времени и делиться этими данными с врачом, пациент может получать более оперативную помощь. Это позволяет врачу своевременно реагировать на изменения состояния пациента и при необходимости корректировать терапевтический план без ожидания очередного очного приема.

У пациентов с рассеянным склерозом можно отследить многие симптомы с помощью «ЕДРО Невроконтроль». Это делается с использованием датчиков и опросников. В начале заболевания, в фазе обострения, выявляются такие симптомы, как нарушение чувствительности с ощущением онемения или парестезией на конечностях или туловище, преходящая потеря зрения, двоение, головокружение. Пациент может отметить эти симптомы в опроснике. Акселерометр хорошо выявляет такие симптомы, как неустойчивость при ходьбе и слабость в конечностях. Через несколько дней или недель датчики фиксируют их исчезновение, и наступает фаза мнимого выздоровления.

Терапия рассеянного склероза в соответствии с клиническими рекомендациями «Рассеянный склероз» от 2022 года [18] включает лечение обострений, изменение течения заболевания и применение симптоматической терапии для коррекции отдельных симптомов. Это позволяет уменьшить длительность фазы обострения и улучшить восстановление функций, снизить частоту обострений и скорость накопления неврологического дефекта, а также устранить симптомы, которые снижают качество жизни пациента. В случае ухудшения состояния система мониторинга «ЕДРО Невроконтроль» анализирует данные и передает их лечащему врачу, который оперативно принимает меры для стабилизации состояния пациента.

Позднее выявление перехода рассеянного склероза из ремиттирующей стадии во вторично прогрессирующую является еще одной проблемой его лечения. Это ведет к нарастанию неврологического дефицита, что, в свою очередь, снижает качество жизни пациента, а следовательно, приводит к повышению степени инвалидизации. Несвоевременная корректировка терапии и затруднение эпидемиологической оценки по типам течения рассеянного склероза рассматривается А. М. Петровым и др. [19]. Также данную проблему разбирают С. А. Лихачев и А. Г. Буняк [20]. При внедрении «ЕДРО Невроконтроль» появляется возможность своевременного «отлавливания» и «удлинения» перехода во вторично прогрессирующее течение для снижения скорости неуклонно нарастающего неврологического дефекта.

Включение мониторинга в жизнь пациента с данной патологией позволяет своевременно корректировать лечение и продлить жизнь, в среднем, до 35 лет, а также отсрочить потерю самостоятельного передвижения до 16 лет, согласно справочнику О. С. Левина и Д. Р. Штульмана [17]. Однако прогнозирование «потенциала» заболевания является сложной задачей, особенно в первые 5 лет.

На рисунке 5 представлен подробный пример использования интегрированной системы ухода «ЕДРО Невроконтроль» для пациента с болезнью Паркинсона. После диагностики и начального этапа лечения в стационаре пациент продолжает восстановление дома, где основное внимание уделяется реабилитации и управлению симптомами.

Система «ЕДРО Невроконтроль» имеет много датчиков, которые помогают следить за разными сторонами здоровья пациента. В этой системе есть акселерометры, которые могут видеть движения и анализировать их частоту и силу. Это очень важно для обнаружения тремора — одного из главных признаков болезни Паркинсона. Гироскопы предоставляют информацию о положении и ориентации тела в пространстве при наличии симптомов мышечной ригидности и гипокинезии, что помогает оценить стабильность и баланс пациента. Эти три симптома являются ключевыми в клинической картине заболевания, как описано в действующих на сегодняшний день клинических рекомендациях «Болезнь Паркинсона, вторичный паркинсонизм и другие заболевания, проявляющиеся синдромом паркинсонизма» от 2021 года [23].

Система может быть дополнена пульсометрами, которые позволяют отслеживать сердечный ритм во время упражнений и в состоянии покоя. Это помогает оценить физическое состояние пациента и его реакцию на нагрузки. Кроме того, система позволяет отслеживать качество и продолжительность сна, что важно для общего благополучия пациентов с болезнью Паркинсона.

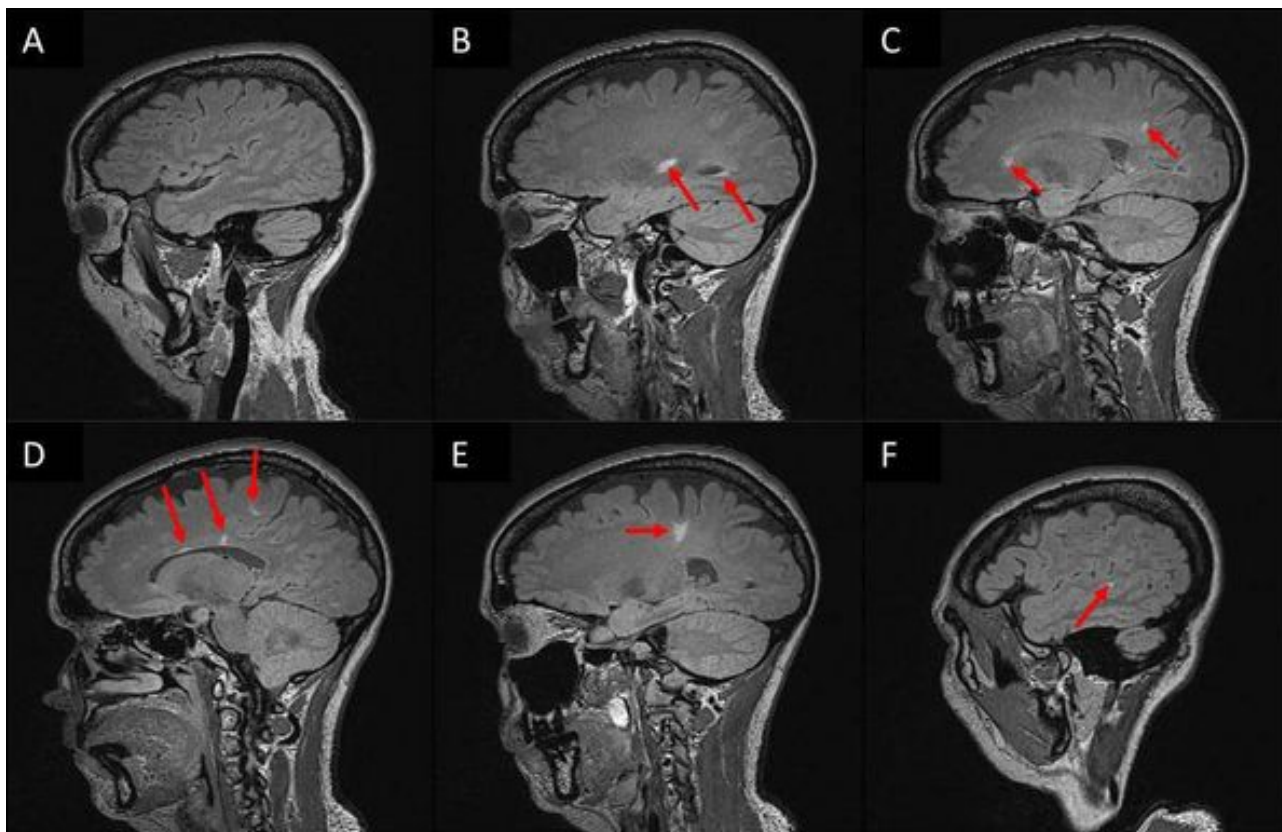


Рис. 3. Неврологические заболевания [21]

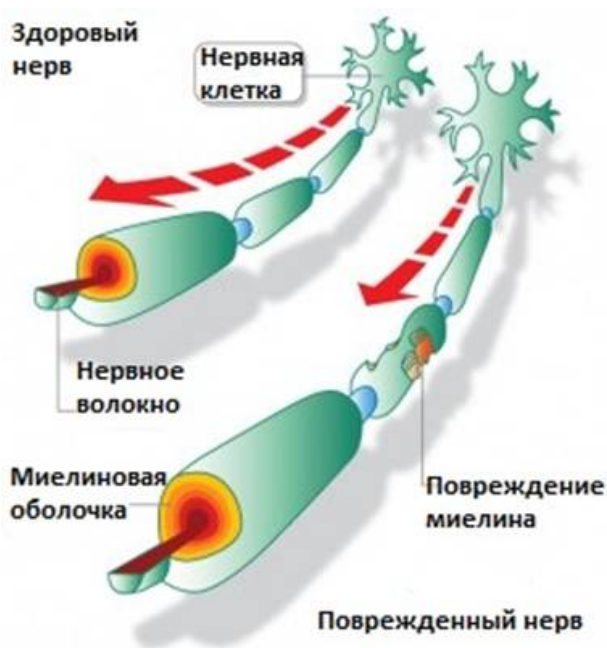


Рис. 4. Повреждение нервных клеток [22]

На сегодняшний день нет средств, которые доказанно способны замедлять прогрессирование данной патологии, но некоторые предположительно обладают этим эффектом, как отмечают О. С. Левин и Д. Р. Штульман. Ведется разработка новых препаратов и выполняются исследования, подтверждающие действие уже существующих.

Система «ЕДРО Невроконтроль» собирает данные в реальном времени, анализирует их и передает лечащему врачу. Это позволяет оперативно адаптировать программу реабилитации и лечения в зависимости от текущего состояния пациента. Система также напоминает пациенту о необходимости

принимать лекарства, выполнять упражнения и проводить другие важные процедуры. Таким образом, «ЕДРО Невроконтроль» создает условия для комплексного подхода к восстановлению, учитывая индивидуальные особенности и потребности каждого пациента, что способствует более быстрому восстановлению утраченных функций и повышению качества жизни.



Рис. 5. Пациент с болезнью Паркинсона [24]

Использование информационных систем в сопровождении неврологических пациентов позволяет улучшить медицинское обслуживание и решить многие проблемы амбулаторного лечения. Информационные технологии играют важную роль в обеспечении непрерывного мониторинга состояния пациентов, повышении их участия в процессе лечения и оптимизации взаимодействия с медицинскими специалистами.

Примером использования информационных систем является создание мобильных приложений, которые помогают пациентам контролировать свое состояние. Эти приложения позволяют вводить данные о самочувствии, симптомах и побочных эффектах лекарственной терапии каждый день. Кроме того, благодаря встроенным датчикам смартфонов, приложение может отслеживать физическую активность, качество сна и другие важные параметры, которые могут указывать на изменения в состоянии здоровья.

Использование информационных систем для предоставления возможности удаленных консультаций с врачами является крайне актуальным для пациентов, которые проживают в отдаленных регионах, где нет возможности получить квалифицированную медицинскую помощь. Телемедицинские платформы предоставляют возможность видеосвязи с врачами-неврологами, передачи биометрических данных и результатов анализов, что позволяет врачу в реальном времени поставить диагноз пациенту и при необходимости скорректировать лечение.

Также современные информационные системы могут применяться для оптимизации логистики в медицинских учреждениях, например, для эффективного планирования приема пациентов, управления медицинской документацией и обмена информацией между различными отделениями и специалистами. Это позволяет сократить время ожидания для пациентов и увеличить количество тех, кто может получить квалифицированную помощь.

В конечном итоге развитие алгоритмов искусственного интеллекта создает возможность для разработки систем, способных автоматически анализировать большие объемы медицинских данных, предсказывать риск развития заболевания и предлагать варианты улучшения стратегии лечения с учетом всех особенностей пациента.

Потенциал современных подходов и количество сфер, где применение информационных тех-

нологий позволяет получить хорошие результаты, велики, и неврология не является исключением, примеры, описанные выше, подтверждают это. Для полноценной реализации потенциала необходимо продолжить исследования и разработки, взаимодействие между ИТ-специалистами, медицинским персоналом, а также пациентами.

Проводимое нами исследование предполагает, что использование в клинической практике первичного медицинского звена информационных систем для сопровождения пациентов неврологического профиля способствует улучшению результатов проводимой терапии, повышению качества жизни пациентов. Рассматриваемые информационные технологии, такие как мобильные приложения и телемедицинские платформы, обладают потенциалом для обеспечения непрерывного отслеживания состояния здоровья пациентов. Своевременное выявление изменений и предотвращение последующих состояний важно не только для населения с временной утратой трудоспособности, но и для пациентов с хроническими неврологическими заболеваниями.

Планируется, что данная технология будет напоминать пациентам о приеме лекарственных средств и соблюдении врачебных рекомендаций, включая ведение здорового образа жизни. Возможность получить эти напоминания поможет пациентам следовать назначенной терапии. Кроме того, оптимизация обмена медицинской информацией между больными и докторами может существенно ускорить процесс принятия клинических решений и повысить эффективность взаимодействия. Это, в свою очередь, может помочь в определении более эффективной лечебной стратегии, своевременной коррекции терапии при необходимости и уменьшении времени, необходимого для достижения желаемых результатов лечения.

Согласно нашим предположениям, применение информационных систем должно уменьшить нагрузку на медицинский персонал, улучшить работу неврологов, вывести на совершенно новый уровень процесс реабилитации пациентов в период амбулаторного лечения в условиях ограниченных ресурсов и высоких требований к качеству и доступности медицинской помощи. Повышение знаний пациентов о заболевании, о назначенной им терапии и реабилитации, благодаря данной технологической разработке, способствует вовлеченности пациента в свое лечение и содействует самому благоприятному течению и исходу заболевания, что приводит к укреплению позиции пациент-ориентированного подхода в медицине.

Как ранее упоминалось, данное исследование имеет цель детально изучить потенциал современных информационных технологий для решения задач, связанных с оказанием неврологической помощи, и определить наиболее перспективные направления, развивать и внедрять их в процесс реабилитации пациентов.

Заключение

В результате исследования сделаны существенные выводы, подтверждающие важность использования информационных систем в сопровождении амбулаторных пациентов неврологического профиля. Проблемы, связанные с лечением и/или уходом в амбулаторных условиях, такие как эпизодическое взаимодействие с медицинским персоналом, в том числе и с врачами смежного профиля при многопрофильном подходе к заболеванию, сложности с самоконтролем самого пациента и нарушением рекомендаций, а также логические и экономические трудности, существенно сказываются на итоге лечения, дальнейшей трудоспособности и качестве жизни больных.

Применение исследованных информационных систем и технологий для наблюдения, контроля и управления состоянием больных может ощутимо благоприятно повлиять на решение данных проблем. Цифровые технологии, такие как мобильные приложения и платформы телемедицины, позволяют непрерывно контролировать состояние пациентов, повышать их заинтересованность в положительном результате лечебного процесса и усиливать сотрудничество между всеми участниками медицинского процесса.

Для полноценной интеграции и эффективного использования информационных систем в амбулаторной неврологической практике необходимы дальнейшие исследования и разработки. Основными аспектами являются не только улучшение технологической составляющей, но и разработка способов внедрения их в клиническую практику, обучение медицинских работников и пациентов использованию этих систем, а также обеспечение безопасности и конфиденциальности медицинской информации.

В итоге данный обзор акцентирует внимание на значимости информационных систем в современной неврологии и указывает на потребность в дополнительных исследованиях и разработках

в этой области. Использование информационных технологий в амбулаторном сопровождении неврологических пациентов может привести к значительному улучшению качества оказываемой пациентам медицинской помощи, повышению эффективности проводимой терапии и в конечном итоге повышению качества их жизни.

Применение информационных систем в амбулаторном сопровождении неврологических пациентов имеет большие перспективы развития и предлагает множество возможностей для улучшения медицинского обслуживания. Мобильные приложения, носимые устройства и телемедицинские платформы, которые развиваются и адаптируются, позволяют медицинской помощи, предоставляемой неврологическим больным, стать лучше. Они способствуют непрерывному наблюдению за состоянием пациентов и делают доступ к специализированным услугам более простым, особенно для людей, живущих в отдаленной местности. Усиление взаимодействия между пациентами и медицинскими специалистами через цифровые платформы также является частью этого процесса. Это помогает ускорить информационный обмен и повышает эффективность лечения.

Интеграция информационных систем с электронными медицинскими записями — это важное направление, которое может значительно улучшить координацию работы специалистов и ускорить принятие клинических решений. Более глубокая интеграция и анализ медицинских данных обеспечивают критически важную оптимизацию лечебных стратегий и повышение их персонализации.

Важным аспектом в контексте перспектив развития является разработка и внедрение образовательных программ для пациентов, использующих информационные технологии. Пациенты могут узнать больше о своих болезнях, о том, как важно следовать рекомендациям врачей и как они могут сами следить за своим здоровьем с помощью данных программ. Более активное участие самих пациентов в процессе лечения и восстановления укрепляет позиции пациент-ориентированного подхода в медицине.

Для реализации этих перспектив необходимо сотрудничество медицинского сообщества, разработчиков технологий и регуляторных органов, то есть развитие улучшенного мультидисциплинарного подхода к проблеме пациента. Успех будет зависеть не только от инноваций в информационных технологиях, но и от создания механизмов для их внедрения в клиническую практику, обеспечения конфиденциальности медицинских данных, разработки моделей финансирования и поддержки инновационных медицинских услуг.

В итоге развитие информационных систем в неврологии открывает новые возможности для улучшения ухода за пациентами и является важным направлением современных медицинских исследований и практик, требующих активного внимания и дальнейшего развития.

Информационная система «ЕДРО Неврология» значительно улучшает процесс реабилитации, ускоряя восстановление пациентов и сокращая время, необходимое для их реабилитации, что дает и экономический эффект. Рисунок 6 наиболее наглядно демонстрирует эффективность подхода, который включает в себя процесс мониторинга и последующего вмешательства. Схема, которая показывает последовательность действий от начальной регистрации пациента до периодического мониторинга его состояния в домашних условиях, подчеркивает преимущества непрерывного медицинского наблюдения.

Врачи могут наблюдать за состоянием пациента в реальном времени с помощью «ЕДРО Неврология», что позволяет своевременно выявлять любые изменения и оперативно пересматривать лечебную стратегию. Сокращение «темного периода» между консультациями позволяет медицинским работникам быстрее реагировать на потребности пациента, корректировать диагнозы и адаптировать лечение. Улучшение здоровья пациента положительно влияет на экономику здравоохранения, сокращая время пребывания в стационаре и количество повторных посещений медицинских учреждений.

С появлением системы «ЕДРО Неврология» процесс ухода за пациентами с неврологическими заболеваниями значительно меняется. Как показано на рисунке 7, состояние пациентов теперь отслеживается непрерывно, начиная с момента регистрации и до выписки, а также после нее. Неврологи систематически собирают данные о состоянии здоровья и анализируют их в реальном времени, что позволяет им следить за динамикой заболевания и строить лечебный план с большей целенаправленностью и благоприятным эффектом.

«ЕДРО Неврология» решает проблему «темной зоны», которая возникала после выписки пациента из стационара, когда невролог не мог отслеживать изменения в состоянии здоровья пациента до

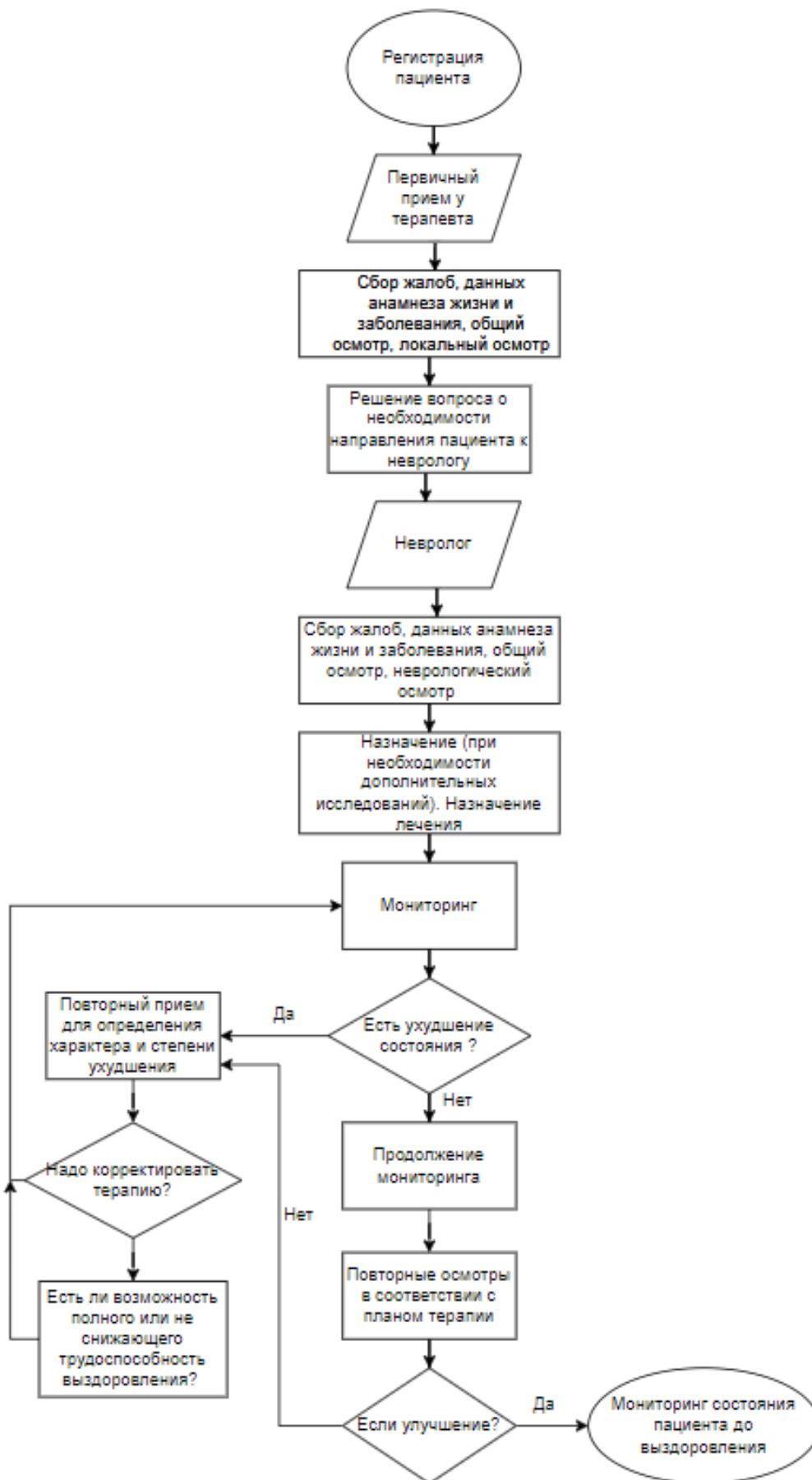


Рис. 6. Прием пациента с внедрением «ЕДРО Неврология»

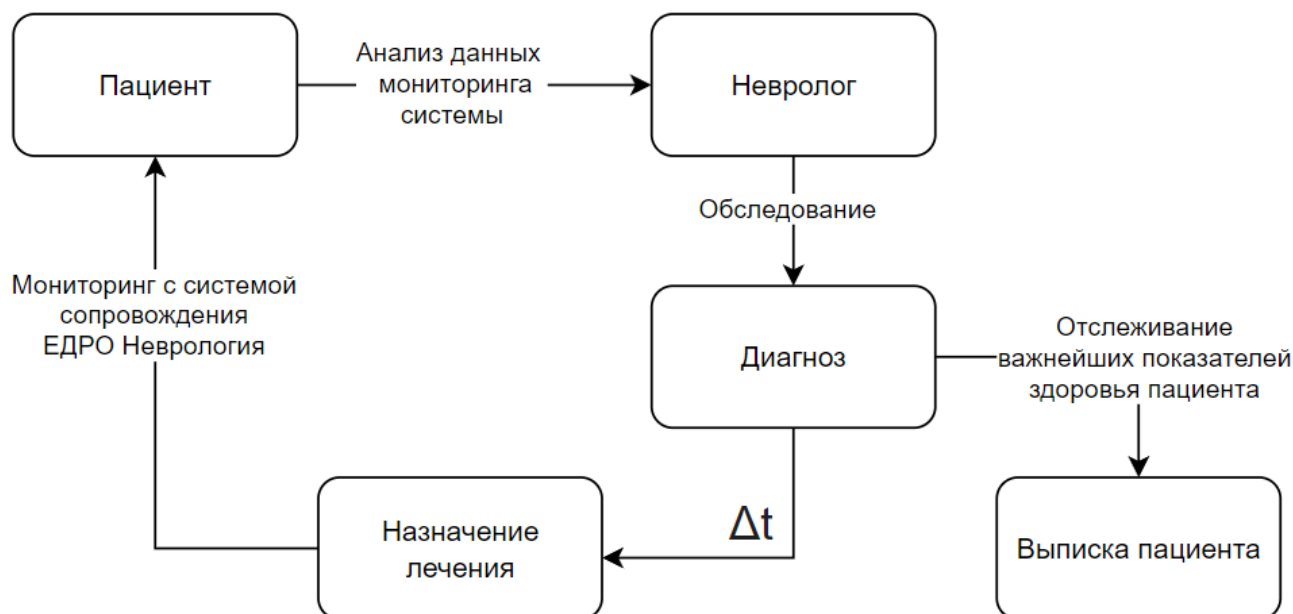


Рис. 7. Сопровождение пациента во время амбулаторного лечения с применением системы сопровождения «ЕДРО Неврология»

следующего посещения. Врачи могут быстро реагировать на любые отклонения в состоянии пациента и адаптировать план лечения или вносить коррективы в реабилитационные программы благодаря постоянному мониторингу (Δt на рис. 7). Уменьшение времени, требуемого для реагирования на изменения в состоянии здоровья, и содействие более быстрому восстановлению функций пациента — это ключевые преимущества.

Информационная система «ЕДРО Неврология» позволяет по-новому взглянуть на уход за неврологическими пациентами, становясь мостом между пациентом и врачом и обеспечивая непрерывный цикл обратной связи, что является необходимым условием успешной реабилитации.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов В. В., Бурмистрова Н. И. Автоматизированные информационные системы как новый подход к управлению рисками фармакотерапии при лечении эпилепсии. *Безопасность и риск фармакотерапии*. 2022;10(2):151–160.
- Ляпина И. Н., Зверева Т. Н., Помешкина С. А. Современные способы дистанционного наблюдения и реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2022;11(1):112–123.
- Осипов А. Н., Пацеев А. В., Пацеев С. В. Алгоритм анализа биомедицинских сигналов в системах дистанционного мониторинга состояния здоровья человека. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2023;21(1):5–11.
- Doxy.me*. Режим доступа: <https://doxy.me>.
- eVisit*. Режим доступа: <https://evisit.com>.
- Mend*. Режим доступа: <https://mend.com>.
- Epic*. Режим доступа: <https://www.epic.com>.
- Cerner*. Режим доступа: <https://www.cerner.com>.
- Medisafe*. Режим доступа: <https://www.medisafe.com>.
- MyTherapy*. Режим доступа: <https://www.mytherapyapp.com>.
- Zoom*. Режим доступа: <https://zoomapp.ru>.
- Google Meet*. Режим доступа: <https://meet.google.com>.
- Microsoft Teams*. Режим доступа: <https://www.microsoft.com>.
- Skype*. Режим доступа: <https://www.skype.com>.
- Discord*. Режим доступа: <https://discord.com>.
- Cerner*. Режим доступа: <https://www.cerner.com>.

17. Левин О. С., Штульман Д. Р. *Неврология: справочник практ. врача*. 14-е изд. М.: МЕДпресс-информ, 2022. 896 с.
18. *Рубрикатор клинических рекомендаций*. Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/739_.
19. Петров А. М., Ивашкова Е. В., Столяров И. Д. Новые возможности терапии вторично-прогрессирующего рассеянного склероза. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2019;11(4):125–129.
20. Лихачев С. А., Буняк А. Г. Прогрессирующий рассеянный склероз: подходы к диагностике и лечению. *Медицинские новости*. 2021;1:28–33.
21. *Шерри Коннелл*. Режим доступа: <https://sherriconnell.com/all-in-my-head>.
22. *Европейская медицина*. Режим доступа: <https://euromedicine.ru/nevrology/sclerotic>.
23. *Рубрикатор клинических рекомендаций*. Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/716_1.
24. Болезнь Паркинсона. Учреждение здравоохранения «5-я городская клиническая больница». Режим доступа: <https://www.5gkb.by/uslugi/napravleniya/nevrologiya/stati/bolezni-parkinsona/>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-10

**СИСТЕМА ОГРАНИЧЕНИЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПЛАНА ДЛЯ
НАПРАВЛЕНИЯ «ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»****М. В. Юрчишина^а, К. И. Бушмелева^б***Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация*^а ✉ nesterenko_mv@surgu.ru, ^б bkiya@yandex.ru

Аннотация: представлено описание системы ограничений для задачи оптимизации учебного плана направления «Информатика и вычислительная техника». Математическая модель оптимального учебного плана может иметь различные виды целевой функции в зависимости от потребностей составителя. При этом система ограничений выделяет множество допустимых значений, и на практике можно использовать ее решение даже без целевой функции. Кроме базовых ограничений на значения номеров семестров и суммарной трудоемкости дисциплин в учебном году, в систему включены ограничения, которые касаются необходимости установления определенной последовательности некоторых связанных дисциплин. На основании экспертного мнения, полученного путем анкетирования в форме матриц парных сравнений, выделены группы связанных дисциплин и установлены логические соотношения между номерами семестров, в которые их следует установить. При обработке результатов матриц парных сравнений использован новый вариант трактовки. Введено понятие коэффициента очередности дисциплин, имеющее локальный смысл для преобразования в значение номера семестра.

Ключевые слова: анализ, матрица парных сравнений, экспертное оценивание, учебный план, оптимизация, система ограничений.

Для цитирования: Юрчишина М. В., Бушмелева К. И. Система ограничений задачи оптимизации учебного плана для направления «Информатика и вычислительная техника». *Успехи кибернетики*. 2024;5(1):82–91. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-10.

*Поступила в редакцию: 27.01.2024.**В окончательном варианте: 20.02.2024.***CONSTRAINTS FOR THE COMPUTER SCIENCE MAJOR CURRICULUM OPTIMIZATION
PROBLEM****M. V. Yurchishina^а, K. I. Bushmeleva^б***Surgut State University, Surgut, Russian Federation*^а ✉ nesterenko_mv@surgu.ru, ^б bkiya@yandex.ru

Abstract: this study presents a set of constraints used in the curriculum optimization problem of computer science majors. A simulation model of an optimal curriculum can have different objective functions as required by the user. The constraints filter out a set of acceptable values so that the filtered values can be used even without solving for the objective function. In addition to basic constraints such as the number of semesters and credit hours for each course, the system also includes constraints that govern the sequence of related courses. We interviewed experts and used the pairwise comparison approach to identify the groups of related courses and to assign them to semesters. We used a new method for processing pairwise comparison matrices. We also introduce the course sequence factor that can be converted into the specific number of the semester.

Keywords: analysis, pairwise comparison matrix, expert evaluation, curriculum, optimization, constraints.

Cite this article: Yurchishina M. V., Bushmeleva K. I. Constraints for the Computer Science Major Curriculum Optimization Problem. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(1):82–91. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-10.

*Original article submitted: 27.01.2024.**Revision submitted: 20.02.2024.***Введение**

Внедрение систем поддержки принятия решений способно снизить нагрузку на специалистов. Однако построение каждой подобной системы требует длительной и многоаспектной подготовки. Чаше

всего решаемая задача содержит большое количество качественных параметров, большое количество переменных и неформализованную цель [1–3]. Построение учебного плана (УП) в высшем учебном заведении в последние десятилетия выполняется практически ежегодно по каждому направлению обучения. Не всегда корректировки предыдущего варианта носят масштабный характер, но даже при внесении небольших изменений зачастую приходится исправлять множество связанных характеристик. Например, при простой перестановке дисциплины из одного семестра в другой придется сбалансировать трудоемкость семестров, после чего может оказаться, что превышено допустимое количество зачетов или одного из видов аудиторной нагрузки. Подобные корректировки хоть и не вызывают сложности, но отнимают много времени и требуют внимательности и сосредоточенности. Если же оказывается, что требуется внести существенные корректировки (добавить дисциплины, изменить трудоемкости и т. п.), тогда отследить все причинно-следственные изменения становится слишком сложно и составление плана требует полной проверки всех условий и ограничений. В настоящее время существует система, которая проверяет часть ограничений, установленных федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС) и учебными заведениями (вузами), но она не предназначена для получения рекомендаций о том, что можно или нужно изменить для выполнения ограничений. Также система не имеет функции оптимизации учебного плана. Существует несколько различных подходов к оптимизации учебного плана [4, 5]. Из этого следует, что актуально создание автоматизированной системы поддержки принятия решений, которая способна улучшить качество разрабатываемого УП и снизить нагрузку на специалистов, отвечающих за разработку и проверку на соответствие требованиям ФГОС и вуза.

Постановка задачи

Оптимизационная задача в математической модели содержит целевую функцию и систему ограничений. Если использовать математическую модель, описанную в [6], то при практическом решении задачи составления УП чаще всего речь не идет об оптимальном решении, достаточно допустимого решения. Поэтому система ограничений, описывающая все допустимые решения, является наиболее важным элементом математической модели. Необходимо записать конкретную систему ограничений, в данном случае для выбранного направления обучения «Информатика и вычислительная техника», используя для соотношений между номерами семестров дисциплин результаты экспертной оценки [7] о наличии связанных групп дисциплин и взаимном расположении их при освоении учебного плана.

Система ограничений

В математической модели, рассматриваемой в данной работе, фактическими переменными являются номера семестров, в которые будут установлены дисциплины. При этом имеющиеся условия построения УП затрагивают трудоемкости дисциплин, которые могут препятствовать установлению некоторых значений семестров в ожидаемые.

Для каждой дисциплины при решении задачи расстановки по семестрам важно учитывать номер семестра и трудоемкость. В результате возникает задача планирования, значительная часть ограничений которой линейная. Можно попробовать привести ее к классической транспортной задаче [8], для этого необходимо ввести весовые коэффициенты, определяющие «стоимость» установки дисциплины в каждый семестр. Таких весовых коэффициентов в предметной области нет, поэтому они введены искусственно и названы коэффициентами значимости дисциплин. Выбранная целевая функция требует достижения максимума, поэтому весовые коэффициенты для недопустимых номеров семестров принимаются равными нулю. Остальные значения коэффициентов значимости в данной работе не обсуждаются, поскольку требуют дополнительного длительного исследования. После введения весовых коэффициентов задача характеризуется матрицей, представленной в таблице 1.

Стандартные методы решения данной задачи как транспортной допускают разделение общей трудоемкости дисциплины на любое количество семестров, однако такой вариант расстановки окажется недопустимым. Можно провести аналогию задачи с задачей о назначениях, но в данном случае назначения не будут однократными с точки зрения семестров, так как в один семестр можно (и необходимо) назначить несколько дисциплин. То есть можно использовать аналогии с методами решения задачи о назначениях, учитывая эту особенность. Также важно учитывать нелинейность целевой функции.

Таблица 1

Примерный вид задачи планирования

Дисциплина/семестр	1	2	3	4	5	6	7	8	Трудоемкость дисциплины
Дисциплина 1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	4
Дисциплина 2	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	3
...									
Дисциплина N	0	0	0	0	0	0	0.9	0.9	9
Суммарная трудоемкость семестра	30	30	30	30	30	30	30	30	240 (сбалансирована)

В качестве численной реализации предполагается последовательный перебор всех вариантов с проверкой всех ограничений для каждого варианта. Для допустимых значений анализируются значения целевой функции.

Как следствие, наиболее важным является построение системы ограничений [9].

Система ограничений оптимизационной задачи содержит 3 группы ограничений:

- номера семестров всех дисциплин должны принимать целые значения в промежутке [1; 8] (количество учебных семестров для бакалавриата — 8);
- уравнения и неравенства, связывающие номера семестров дисциплин, которые в своем содержании опираются на содержание других дисциплин (семантические связи);
- суммарные ограничения трудоемкости дисциплин (требования ФГОС).

Для описания задачи вводятся обозначения:

- N — количество дисциплин в учебном плане;
- x_i — номер семестра, в котором изучается дисциплина с номером i , $1 \leq i \leq N$, $i \in \mathbb{N}$;
- z_i — трудоемкость (в зачетных единицах, з. е.) дисциплины с номером i , $1 \leq i \leq N$, $i \in \mathbb{N}$;
- p_i — коэффициент значимости дисциплины с номером i , $p_i \in (0,1)$, i , $1 \leq i \leq N$, $i \in \mathbb{N}$.

Чаще всего количество семестров при обучении на уровне бакалавриата очной формы обучения составляет 8, количество курсов — 4. Эти величины фиксированы, однако для обеспечения возможности обобщения на уровень магистратуры или другого вида образования следует ввести переменные для их обозначения:

- S — количество семестров;
- C — количество лет, отведенных на освоение программы.

При решении данной задачи предполагается, что коэффициенты значимости известны. Их значения необходимо подобрать заранее. Предположительно они будут следующими (их определение будет производиться дополнительно за рамками данной работы):

- для общеобразовательных дисциплин $p \approx 0.1$;
- для общепрофессиональных дисциплин $p \approx 0.5$;
- для профессиональных дисциплин $p \approx 0.9$.

В таких обозначениях первая часть системы ограничений принимает вид:

$$1 \leq x_i \leq S, \quad \forall i: 1 \leq i \leq N, i \in \mathbb{N}. \quad (1)$$

Количество таких условий составляет N .

Вторая часть системы ограничений требует экспертного оценивания и основывается на мнении экспертов о взаимном расположении дисциплин в группах, связанных семантически. Ранее авторами было выделено три таких группы, определены их составы и попарное взаимное расположение дисциплин внутри каждой группы [6].

В первой группе — математических дисциплинах — выделено 13 дисциплин. Экспертное оценивание [7] показало взаимное расположение этих дисциплин. Для удобства использования экспертные оценки были преобразованы в усредненный коэффициент очередности. Значение коэффициента представляет из себя усредненное значение суммарного значения оценок каждой дисциплины матриц парных сравнений различных экспертов. Чем больше полученное значение, тем раньше должна быть изучена дисциплина, и, наоборот, чем меньше значение коэффициента, тем в более поздний семестр можно установить дисциплину. Также в [7] предложен вариант интерпретации значений коэффициентов для возможности установки нескольких дисциплин в один семестр. Значения полученных коэффициентов и рекомендаций по выбору семестров приведены в таблице 2.

Таблица 2

Усредненные коэффициенты очередности дисциплин математической группы

Название дисциплины		Математический анализ 1	Линейная алгебра	Математический анализ 2	Аналитическая геометрия	ТФКП	Дифференциальные уравнения	Теория вероятностей	Дискретная математика	Математическая статистика	Математическая логика	Методы оптимизации	Исследование операций	Вычислительная математика
Полученные средние коэффициенты очередности дисциплин		22	21	17	18	10	12	13	16	10	11	7	5	4
Рекомендуемый номер семестра	Наименьший	1	1	2	2	4	3	3	2	4	4	5	6	6
	Наибольший	1	1	2	2	5	4	4	3	5	5	6	7	7

В данной работе важно не установить конкретный номер семестра, а составить ограничения, которые гарантируют учет экспертного мнения при решении оптимизационной задачи. Для составления конкретных равенств и неравенств необходимо установить выбранным дисциплинам номера.

Пусть в группе математических дисциплин установлены номера, приведенные в таблице 3.

В таблице 3 для наглядности представлены обозначения номеров семестров для всех дисциплин группы.

Анализируя таблицу 2, можно сделать вывод, что в один семестр могут быть установлены дисциплины, значения коэффициентов очередности которых отличаются на 1–2 единицы. Таким образом, первые две дисциплины с коэффициентами 21 и 22 можно зафиксировать в первом семестре (с точки зрения математической постановки можно этого не делать, но учитывая, что снижение размерности приведет к ускорению решения, лучше это сделать). В результате получаются ограничения (2):

$$x_1 = x_2 = 1. \quad (2)$$

Так, например, дисциплина «Математический анализ 2» должна быть установлена строго в следующий семестр после дисциплины «Математический анализ 1», а дисциплина «Аналитическая геометрия» наилучшим образом будет изучаться сразу после дисциплины «Линейная алгебра». Как следствие, получаются ограничения (3):

$$x_3 = x_1 + 1, \quad x_4 = x_2 + 1. \quad (3)$$

Фактически это ограничение можно записать как (4):

$$x_3 = x_4 = 2. \quad (4)$$

Таблица 3

Номера дисциплин математической группы, установленные для построения ограничений

Название дисциплины	Математический анализ 1	Линейная алгебра	Математический анализ 2	Аналитическая геометрия	ТФКП	Дифференциальные уравнения	Теория вероятностей	Дискретная математика	Математическая статистика	Математическая логика	Методы оптимизации	Исследование операций	Вычислительная математика
Номер дисциплины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Номер семестра, в который устанавливается дисциплина	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}

Коэффициент дисциплины «Дискретная математика» следует в порядке уменьшения за рассмотренными. Учитывая анализ непосредственных значений в матрицах парных сравнений, где большинство экспертов указали, что данную дисциплину можно изучать либо вместе с «Математический анализ 2» и «Аналитическая геометрия», либо после них, но при этом данную дисциплину следует изучать после «Математический анализ 1» и «Линейная алгебра», можно записать ограничение (5) или (6):

$$x_8 \geq x_3, \quad (5)$$

$$x_8 \geq x_4. \quad (6)$$

Ограничения (5) и (6) равнозначны, достаточно использовать одно из них.

Дисциплины «Дифференциальные уравнения» и «ТФКП» являются продолжением дисциплины «Математический анализ», требуя знания данного курса. Также в некоторых учебных изданиях их включают в курс «Математический анализ». Поэтому желательно их расположить непосредственно после данной дисциплины. При этом их можно изучать как параллельно, так и последовательно, поэтому ограничения примут вид (7):

$$x_5 > x_3, \quad x_6 > x_3. \quad (7)$$

Для обеспечения отсутствия разрыва при изучении данных дисциплин после дисциплины «Математический анализ», ограничения (6) можно дополнить условием (8):

$$\min \{x_5, x_6\} = x_3 + 1. \quad (8)$$

С учетом (4) можно записать (9):

$$\min \{x_5, x_6\} = 3. \quad (9)$$

Дисциплина «Теория вероятностей», по оценкам экспертов, требует предварительного изучения дисциплин «Математический анализ» и «Линейная алгебра», при этом не привязана к ним, а является принципиально отличным разделом математики. Следовательно, для нее можно записать (10):

$$x_7 > x_3. \quad (10)$$

Дисциплина «Математическая статистика» является логическим продолжением дисциплины «Теория вероятностей», также некоторые учебные издания объединяют их, тогда можно записать (11):

$$x_9 = x_7 + 1. \quad (11)$$

Дисциплина «Математическая логика» использует большое количество понятий и методов из дисциплин «Линейная алгебра» и «Дискретная математика», однако она не требует установки строго после них, поэтому можно записать (12):

$$x_{10} > x_2, \quad x_{10} > x_8. \quad (12)$$

Учитывая формулы (2), (4) и (7), можно упростить выражение (12), исключив транзитивную зависимость, получится (13):

$$x_{10} > x_8. \quad (13)$$

Дисциплины «Методы оптимизации», «Исследование операций» требуют знания всех базовых математических дисциплин. Сами они могут содержать различные наборы глав, могут пересекаться по содержанию, при этом не требуют четкой последовательности между собой. Следовательно, условия для их установки имеют вид (14):

$$x_{11} > \max \{x_5, x_6\}, \quad x_{12} > \max \{x_5, x_6\}. \quad (14)$$

Дисциплина «Вычислительная математика» может содержать методы оптимизации, следовательно, ее необходимо расположить после изучения соответствующей дисциплины. Получится условие (15):

$$x_{13} > x_{11}. \quad (15)$$

Во второй группе дисциплин, касающихся информатики, выделено 6 дисциплин. Не все их названия носят устоявшийся характер, могут варьироваться. В таблице 4 представлен примерный вариант набора дисциплин данной группы с их усредненными коэффициентами очередности.

Таблица 4

Усредненные коэффициенты очередности дисциплин группы информатики

Название дисциплины	Информатика	Введение в профессиональную деятельность ИВТ	Операционные системы	Информационные технологии	ЭВМ и периферийные устройства	Теория информации
Полученные средние коэффициенты очередности дисциплин	9	8	4	5	5	4

Дисциплинам этой группы также присваиваются номера, и вводятся обозначения номеров семестров, в которых они изучаются (табл. 5).

Ограничения на номера семестров, в которых изучается данная группа дисциплин, не связаны с ограничениями (2)–(15).

Хотя количество дисциплин в рассматриваемой группе всего 6, все они являются базовыми для данного направления, то есть желательно их изучение в наиболее ранних семестрах. Анализируя значения усредненных коэффициентов очередности, можно установить (16):

$$x_{14} = 1. \quad (16)$$

Аналогично (1), это ограничение можно не устанавливать, с математической точки зрения, но для сокращения размерности задачи и ускорения процесса решения — это лучше делать, поскольку дисциплина «Информатика», как правило, изучается в первом семестре.

Таблица 5

Номера дисциплин группы информатики

Название дисциплины	Информатика	Введение в профессиональную деятельность ИВТ	Операционные системы	Информационные технологии	ЭВМ и периферийные устройства	Теория информации
Номер дисциплины	14	15	16	17	18	19
Номер семестра, в котором изучается дисциплина	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}

Дисциплина «Введение в профессиональную деятельность» может изучаться как параллельно с «Информатикой», так и позднее, т. к. значения коэффициентов очередности отличаются всего на единицу. Но устанавливать ее позднее 2 семестра не следует. Поэтому можно записать ограничение (17):

$$x_{15} \leq 2. \quad (17)$$

Дисциплины «Информационные технологии» и «ЭВМ и периферийные устройства» имеют одинаковые коэффициенты очередности, значительно меньшие, чем коэффициент для «Введения в профессиональную деятельность», следовательно, ограничения имеют вид (18):

$$x_{17} > x_{15}, \quad x_{18} > x_{15}. \quad (18)$$

Дисциплины «Операционные системы» и «Теория информации» имеют одинаковые коэффициенты очередности, меньшие всего на 1, чем «Информационные технологии» и «ЭВМ и периферийные устройства», следовательно, их можно изучать либо позднее, либо параллельно с ними ((19), (20)):

$$x_{16} \geq x_{17}, \quad x_{19} \geq x_{17}, \quad (19)$$

$$x_{16} \geq x_{18}, \quad x_{19} \geq x_{18}. \quad (20)$$

Условия (19)–(20) можно объединить и записать (21):

$$x_{16} \geq \max \{x_{17}, x_{18}\}, \quad x_{19} \geq \max \{x_{17}, x_{18}\}. \quad (21)$$

Третья группа дисциплин, выделенная при исследовании, — дисциплины, связанные с программированием. В экспертном исследовании выделено 7 дисциплин, входящих в данную группу. В таблице 6 представлены значения полученных усредненных коэффициентов очередности для данной группы.

В таблице 7 представлены номера дисциплин данной группы и соответствующие им номера семестров.

Дисциплины группы программирования могут присутствовать во всех семестрах, может быть, за исключением последнего. Они составляют существенную часть компетенций, формируемых образовательной программой. Дисциплины данной группы, как правило, воспринимаются студентами как наиболее интересные и значимые, поэтому желательно распределить их наиболее равномерно по семестрам.

Наибольшее в данной группе значение коэффициента очередности, а, следовательно, наименьший номер семестра, соответствует дисциплине «Основы программирования». Аналогично другим группам, можно записать (22):

$$x_{20} = 1. \quad (22)$$

Таблица 6

Усредненные коэффициенты очередности дисциплин группы программирования

Название дисциплины	Основы программирования	Алгоритмические языки программирования	Системное программное обеспечение	Технологии программирования	Объектно-ориентированное программирование	WEB-программирование	Программирование мобильных устройств
Полученные средние коэффициенты очередности дисциплин	13	10	8	8	5	3	2

Таблица 7

Номера дисциплин группы программирования

Название дисциплины	Основы программирования	Алгоритмические языки программирования	Системное программное обеспечение	Технологии программирования	Объектно-ориентированное программирование	WEB-программирование	Программирование мобильных устройств
Номер дисциплины	20	21	22	23	24	25	26
Номер семестра, в котором изучается дисциплина	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}

Коэффициент очередности для дисциплины «Алгоритмические языки программирования» отличается значительно, значит, условие для данной дисциплины можно записать следующим образом (23):

$$x_{21} > x_{20}. \quad (23)$$

Для дисциплин «Системное программное обеспечение» и «Технологии программирования» коэффициенты очередности одинаковы и меньше, чем для дисциплины «Алгоритмические языки программирования». Так как в данной группе количество дисциплин совпадает с количеством семестров, желательно расположить хотя бы одну дисциплину из группы в каждом семестре. Данное утверждение можно трактовать следующим образом: дисциплины следует расположить в двух смежных семестрах, не устанавливая между ними очередности. Таким образом записывается (24):

$$x_{22} > x_{21}, \quad x_{23} > x_{21}, \quad |x_{22} - x_{23}| = 1. \quad (24)$$

Следующий коэффициент очередности соответствует дисциплине «Объектно-ориентированное программирование», условие для получения номера ее семестра имеет вид (25):

$$x_{24} > x_{22}, \quad x_{24} > x_{23}. \quad (25)$$

Условие (24) можно заменить на эквивалентное ему (26):

$$x_{24} \geq \max \{x_{22}, x_{23}\}. \quad (26)$$

Следующее значение коэффициента очередности в данной группе соответствует дисциплине «WEB-программирование». Ограничение для номера семестра данной дисциплины можно записать (27):

$$x_{25} > x_{24}. \quad (27)$$

Коэффициент очередности дисциплины «Программирование мобильных устройств» в данной группе принимает самое маленькое значение, тогда неравенство для номера ее семестра можно записать (28):

$$x_{26} > x_{25}. \quad (28)$$

Вторая часть системы ограничений может содержать и другие условия, которые устанавливаются при формировании УП непосредственным выбором очередности дисциплин составителем плана.

Третья часть в системе ограничений касается равномерного распределения суммарной трудоемкости дисциплин по семестрам. ФГОС устанавливает ограничение на суммарную трудоемкость дисциплин учебного года — она не должна превышать 70 з. е. (суммарная трудоемкость образовательной программы бакалавриата составляет 240 з. е. без учета факультативных дисциплин). Если распределить суммарную трудоемкость равномерно, то при четырехлетнем сроке освоения программы получится 60 з. е. в год. Кроме этого, ФГОС устанавливает необходимость включения факультативных дисциплин, объем которых может быть установлен образовательной организацией. Тогда фактическая трудоемкость образовательной программы увеличивается. С учетом наличия факультативных дисциплин уместно будет установить не только ограничение в 70 з. е. на каждый год, но и дополнительно сбалансировать распределение общей трудоемкости по семестрам.

Пусть суммарная трудоемкость образовательной программы составляет T з. е. Эта трудоемкость включает и 240 з. е., установленных ФГОС, и все трудоемкости факультативных дисциплин.

Также трудоемкость каждого семестра не обязательно должна быть одинаковой, но и не должна сильно отличаться от среднего значения. Для составления условий необходимо ввести дополнительные обозначения:

- T_s — средняя трудоемкость семестра;
- T_{s_k} — трудоемкость семестра с номером k ($k \in [1, S]$);
- T_{C_p} — трудоемкость учебного года с номером p ($p \in [1, C]$);
- l — допустимое отклонение фактической трудоемкости семестров от средней.

Тогда ограничение трудоемкости в каждом семестре устанавливается (29):

$$T_s - l \leq T_{s_k} \leq T_s + l, \quad \forall k \in [1, S]. \quad (29)$$

Значения T_s и T_{s_k} вычисляются по формулам (30) и (31) соответственно:

$$T_s = \frac{T}{S}, \quad (30)$$

$$T_{s_k} = \sum_{s=1}^N z_{s/k}, \quad \forall k \in [1, S], \quad (31)$$

здесь $z_{s/k}$ обозначена трудоемкость дисциплины с номером s при условии, что номер семестра, в который она установлена, равен k .

Ранее упоминалось, что суммарное значение трудоемкости в учебном году не должно превышать 70 з. е., это значение зафиксировано в ФГОС, но для обобщения следует ввести параметр, который принимает это значение, — $T_c = 70$. Тогда условие запишется в форме (32):

$$T_{C_p} \leq T_c, \quad \forall p \in [1, C]. \quad (32)$$

Окончательно система ограничений для оптимизации учебного плана по направлению «Информатика и вычислительная техника» будет состоять из формул (1), (2), (4), (5), (7), (8), (9), (10), (11), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (21), (22), (23), (24), (26), (27), (28), (29), (32). При этом условия (1), (29) и (32) не зависят от направления обучения, а остальные будут меняться для каждого направления обучения в зависимости от набора дисциплин образовательной программы и их взаимосвязей.

Заключение

Предложенная система ограничений для решения задачи оптимизации позволит определить множество допустимых значений номеров семестров всех дисциплин учебного плана. Большая часть условий являются линейными относительно искомым значениям номеров семестров. Исключением представляются условия последней группы, здесь номера семестров являются критерием попадания конкретной дисциплины в конкретное условие. Следовательно, методы решения оптимизационной задачи не могут быть основаны на механизмах решения задач линейного программирования. Размерность задачи предполагает построение численного решения.

При численной реализации составитель УП должен иметь возможность корректировки системы ограничений, поэтому полученные в данной работе условия будут предложены как рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларичев О. И., Петровский А. Б. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития. *Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика*. 1987;21:131–164.
2. Сараев А. Д., Щербина О. А. Системный анализ и современные информационные технологии. *Труды Крымской Академии наук*. Симферополь: СОНАТ; 2006. С. 47–59.
3. Халин В. Г. *Системы поддержки принятия решений: учеб. и практикум для вузов* / под ред. В. Г. Халина, Г. В. Черновой. М: Издательство Юрайт; 2023. 494 с.
4. Алексахин С. В., Николаев А. Б., Строганов В. Ю. Моделирование связности дисциплин учебного плана в системе дистанционного образования. *Информационные технологии в образовании (ИТО-2001). Секция 3. ИТ в открытом образовании: мат. XI Международ. конф.-выставки*. М.: МИФИ; 2001.
5. Лавлинская О. Ю. Ранжирование учебных дисциплин с использованием экспертных оценок. *Моделирование систем и информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3. Ч. 2*. Воронеж: Научная книга; 2006. С. 80–83.
6. Юрчишина М. В., Бушмелева К. И. Математическое моделирование процесса оптимизации учебного плана высшего образования. *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сб. тр. нац. науч.-практ. конф.* М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 141–144.
7. Юрчишина М. В., Бушмелева К. И. Экспертное оценивание структуры и состава группы математических дисциплин учебного плана для студентов бакалавриата по направлению «Информатика и вычислительная техника». *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сб. тр. нац. науч.-практ. конф.* М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 702–708.
8. Вентцель Е. С. *Исследование операций*. М.: Высшая школа; 2001. 208 с.
9. Рыков А. С. *Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации*. М.: Издательский Дом МИСиС; 2009. 608 с.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 29.03.2024.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 6,2. Уч.-изд. л. 9,2.

Цена свободная.