



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

2025 Том 26 № 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии, заведующий кафедрой механики и процессов управления инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», факультет «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Ответственный секретарь

Агасиева Светлана Викторовна — кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Агравал Бридж — профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

Алифанов Олег Михайлович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Варатараджу Ренугант — профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

Василе Массимилиано Л. — профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

Вивiani Антонио — профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

Гасбарри Паоло — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Герман Анна — профессор, Университет Бейра-Интернор, Ковильян, Португалия

Гитас Иоаннис Зоис — профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

Грациани Филиппо — почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Гурфил Пини — почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Джеа Мориба — доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

Джесента Джанкарло — профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

Кавазутти Дзюньитиро — профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

Калугин Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Капустин Владимир Михайлович — доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Кузнецов Николай Борисович — профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

Линарес Ричард — профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

Матюшин Максим Михайлович — доктор технических наук, Центр управления полетами ЦНИИмаш, ГК «Роскосмос», Королев, Россия

Медведев Андрей Всеволодович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Мисра Арун — профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

Мортари Даниэле — профессор, Техасский университет А&М, Колледж-Стейшн, США

Мохаммед Сейду О. — профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

Палмерини Джованни — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Петухов Вячеслав Георгиевич — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Попков Юрий Соломонович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

Попов Гарри Алексеевич — академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Прадо Антонио — профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

Редько Иван Яковлевич — доктор технических наук, профессор, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Москва, Россия

Спенсер В. Дэвид — профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, США

Фурфаро Роберто — профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

Челани Фабио — профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Черн Рок Ченг-Шинг — профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

Ясакэ Тэцуо — почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» — периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);
- 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

Редактор *И.Л. Панкратова*

Редактор англоязычных текстов *А.С. Корзин, Е.Ф. Шалеева, Н.А. Алексеева*
Компьютерная верстка *Н.В. Маркеловой*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала

«Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engi@rudn.ru

Подписано в печать 19.03.2025. Выход в свет 30.03.2025. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 12,32. Тираж 500 экз. Заказ № 64. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2025 Volume 26 Number 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Yury N. Razoumny — Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Head of the Department of Mechanics and Control Processes of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik — Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 "Composite Materials for Aerospace", Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva — Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

Editorial Board

Brij Agrawal — Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Oleg M. Alifanov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Fabio Celani — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Rock Jeng-Shing Chern — Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

Roberto Furfaro — Professor, University of Arizona, Tucson, USA

Paolo Gasbarri — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Giancarlo Genta — Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

Ioannis Zois Gitis — Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Filippo Graziani — Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Anna Guerman — Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

Pini Gurfil — Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Moriba Jah — Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

Vladimir T. Kalugin — Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir M. Kapustin — Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russia

Junichiro Kawaguchi — Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

Nikolay B. Kuznetsov — Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Richard Linares — Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Maxim M. Matyushin — Dr. (Technical Sciences), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIMash), State Space Corporation "Roscosmos", Korolev, Russia

Andrey V. Medvedev — Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Arun Misra — Professor, McGill University, Montreal, Canada

Seidu O. Mohammed — Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

Daniele Mortari — Professor, Texas A&M University, College Station, USA

Giovanni Palmerini — Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Vyacheslav G. Petukhov — Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Yury S. Popkov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Harri A. Popov — Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Antonio Prado — Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

Ivan Y. Redko — Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovsky Energy Institute, Moscow, Russia

David B. Spencer — Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

Massimiliano L. Vasile — Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Antonio Viviani — Professor, University of Campania "Luigi Vanvitelli", Naples, Italy

Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, ResearchBib, Lens, Research4Life, JournalTOCs, British Library, Bodleian Libraries (University of Oxford), Ghent University Library.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research — is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE:

<http://publicationethics.org>

Copy Editor *I.L. Pankratova*

English Texts' Editor *A.S. Korzin, E.F. Shaleeva, N.A. Alekseeva*

Layout Designer *N.V. Markelova*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Ph.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Ermilov A.S., Saltykova O.A. Application of Machine Learning for Adaptive Trajectory Control of UAVs Under Uncertainty (Применение машинного обучения для адаптивного управления траекториями БПЛА в условиях неопределенности)	7
Korsun O.N., Om M.H. Development of a Time Domain Identification Algorithm with a Spectral Objective Function (Разработка алгоритма идентификации во временной области со спектральной целевой функцией)	17
Сигитов О.Ю. Сравнительный анализ динамического коэффициента неравномерности ветровых электростанций в различных энергосистемах	28
Rogachev A.F., Zakharov D.S. A Systematic Approach to Ontology Construction for Automating the Scheduling of a Multilevel University (Системный подход к построению онтологии для автоматизации составления расписания многоуровневого вуза)	39
Подкин К.И., Назарова Ю.А. Математическое моделирование управления организационными проектами	52
Бойков А.А., Назарова Ю.А., Семенцов Д.А., Шишкин И.В., Маликов Е.А., Подкин К.И. Разработка алгоритма поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта	63
Толманова В.В., Андриков Д.А. Применение стохастических методов, вейвлет-преобразований и опорных векторов для исследования сигналов электроэнцефалограмм	77
Ганьшин А.С., Андриков Д.А. Разработка математической модели для построения биоискусственной печени	86
Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S. Influence of Environmental Temperature on the Corrosion Resistance of Various Aluminum Alloys: an Experimental Study (Влияние температуры окружающей среды на коррозионную стойкость различных алюминиевых сплавов: экспериментальное исследование)	94

CONTENTS

Ermilov A.S., Saltykova O.A. Application of Machine Learning for Adaptive Trajectory Control of UAVs Under Uncertainty	7
Korsun O.N., Om M.H. Development of a Time Domain Identification Algorithm with a Spectral Objective Function	17
Sigitov O.Yu. Comparative Analysis of Wind Farms Dynamic Coefficient of Unevenness in Various Energy Systems	28
Rogachev A.F., Zakharov D.S. A Systematic Approach to Ontology Construction for Automating the Scheduling of a Multilevel University	39
Podkin K.I., Nazarova Yu.A. Mathematical Modeling of Organizational Project Management	52
Boykov A.A., Nazarova Yu.A., Sementsov D.A., Shishkin I.V., Malikov E.A., Podkin K.I. Development of an Algorithm for Searching Candidates to Form the Initial Project Team	63
Tolmanova V.V., Andrikov D.A. Application of Stochastic Methods, Wavelet Transformations and Support Vectors for the Study of Electroencephalogram Signals	77
Ganshin A.S., Andrikov D.A. Development of a Mathematical Model for the Design of a Bio-Artificial Liver	86
Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S. Influence of Environmental Temperature on the Corrosion Resistance of Various Aluminum Alloys: an Experimental Study	94



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-7-16

EDN: JNLPXG

Research article / Научная статья

Application of Machine Learning for Adaptive Trajectory Control of UAVs Under Uncertainty

Alexander S. Ermilov[✉], Olga A. Saltykova[✉]

RUDN University, Moscow, Russia
✉ saltykova-oa@rudn.ru

Article history

Received: November 12, 2024

Revised: January 15, 2025

Accepted: January 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The article explores the potential of applying machine learning (ML) for adaptive trajectory control of unmanned aerial vehicles (UAVs) under uncertainty. The concepts of ML algorithms and the classification of UAVs by purpose, size, and weight are examined. To analyze control methods, theoretical approaches such as ensemble learning, neural networks, and probabilistic models are applied, enabling real-time adaptation of flight trajectories. Additionally, mathematical models are presented and illustrated with formulas describing the dynamics of interaction between the control system, external disturbances, and control inputs. Parameters such as system adaptability, trajectory correction accuracy, and stability under challenging conditions are studied to assess the accuracy and efficiency of the proposed algorithms. The study also investigates the impact of computational power limitations on the real-time performance of algorithms. The integration of data from various sensors is considered crucial for improving the accuracy and reliability of the control system. Special attention is given to the practical application of ML for environmental change prediction and flight trajectory optimization. Examples of real-world ML algorithm implementations include successful developments by Russian and foreign companies, demonstrating high levels of autonomy and adaptive control. The results show that ML significantly enhances UAV autonomy and safety, ensuring reliable trajectory corrections even under uncertain conditions. Further research could focus on developing collective control for UAV groups and improving real-time ML integration. This would expand UAV functionality, improve efficiency, and reduce resource consumption.

Keywords: machine learning, adaptive control, unmanned aerial vehicles, drones, flight trajectories, algorithms, autonomy

Authors' contribution:

Ermilov A.S. — developing the concept of the article, conducting research, preparing and editing the text; *Saltykova O.A.* — analysis of the data obtained, approval of the final version of the article.

For citation:

Ermilov AS, Saltykova OA. Application of machine learning for adaptive trajectory control of UAVs under uncertainty. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-7-16>



Применение машинного обучения для адаптивного управления траекториями БПЛА в условиях неопределенности

А.С. Ермилов^{ORCID}, О.А. Салтыкова^{ORCID}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ saltykova-oa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 октября 2024 г.

Доработана: 15 января 2025 г.

Принята к публикации: 25 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Исследованы возможности применения машинного обучения (МО) для адаптивного управления траекториями беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях неопределенности. Изучены концепции алгоритмов МО и классификация БПЛА по назначению, размеру и весу. Для анализа методов управления применялись теоретические подходы, такие как ансамблевое обучение, нейронные сети и вероятностные модели, позволяющие адаптировать траектории полета в реальном времени. В дополнение к этому представлены математические модели, которые проиллюстрированы формулами, описывающими динамику взаимодействия системы управления с внешними возмущениями и управляющими воздействиями. Для оценки точности и эффективности предложенных алгоритмов изучены параметры, включающие адаптивность системы, точность корректировки маршрутов и устойчивость в сложных условиях. Также исследовано влияние ограничений вычислительных мощностей на работу алгоритмов в реальном времени. Рассмотрена роль интеграции данных с различных датчиков для повышения точности и надежности системы управления. Особое внимание уделено практическому применению МО для прогнозирования изменений окружающей среды и оптимизации полетных траекторий. Примеры использования алгоритмов МО в реальных проектах включают успешные разработки российских и зарубежных компаний, демонстрирующие высокую автономность и адаптивность управления. Результаты исследования демонстрируют, что использование МО позволяет существенно повысить автономность и безопасность БПЛА, обеспечивая надежную корректировку маршрутов даже в условиях неопределенности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку коллективного управления группами БПЛА и улучшение интеграции МО в реальном времени. Это позволит расширить функциональность БПЛА, повысить их эффективность, а также снизить ресурсозатраты.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, дроны, траектории полета, алгоритмы машинного обучения

Вклад авторов:

Ермилов А.С. — разработка концепции, проведение исследования, подготовка и редактирование текста;
Салтыкова О.А. — анализ полученных данных, утверждение окончательного варианта статьи

Для цитирования:

Ermilov A.S., Saltykova O.A. Application of machine learning for adaptive trajectory control of UAVs under uncertainty // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-7-16>

Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are an integral part of many areas, including military, agriculture, environmental monitoring (EM), and logistics. Effective UAV flight control under EM uncertainty is one of the key challenges facing researchers and engineers. The main challenge is the need for real-time trajectory adaptation, which requires a high degree of autonomy.

Machine learning (ML) provides new opportunities for solving adaptive control problems. ML algorithms are able to analyze large amounts of data and extract patterns from them, which allows predicting changes in EM conditions and adjusting the flight trajectory.

The purpose of this paper is to explore the theoretical foundations of ML application for adaptive UAV control under EM uncertainty. The main principles of ML are considered, and existing theoretical approaches and models are analyzed.

1. Methods

The study used both empirical and theoretical methods of data analysis and processing. The work is based on modeling, which allows describing the trajectory of objects based on mathematical relationships and ML algorithms. The work used an experimental method, including simulation calculations and testing the proposed algorithms on simulated data.

Among the theoretical research methods, analysis and synthesis were used, aimed at systematizing existing UAV trajectory control models, as well as abstraction and analogy, which allow identifying general patterns and adapting known methods to new conditions. In addition, a classification was used to structure approaches to ML in this area.

For a quantitative assessment of the effectiveness of the developed methods, statistical methods and quantitative analysis were used, allowing to identify patterns and evaluate the accuracy of model predictions. This approach ensures the reliability and objectivity of the conclusions, which makes the research results applicable in the adaptive UAV control.

2. Results

2.1. ML Algorithm Concepts

Machine learning (ML) is a field of artificial intelligence (AI) that focuses on developing algorithms and models that can learn and make decisions based on data. Researchers estimate that the global ML market will exceed \$150 billion in 2023.

ML is based on the principles of statistics, probability theory, and optimization, which allows you to create systems that can improve their performance with experience. The main difference between ML and traditional programming is the ability to independently identify patterns and adapt to new data without the need for explicit programming. ML is based on several key concepts:

Supervised learning (SL) on labeled data containing input and corresponding output values (Figure 1).

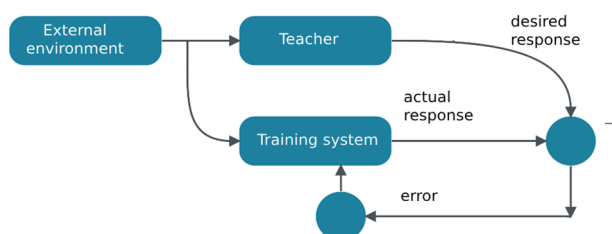


Figure 1. Supervised learning scheme

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

The external environment provides input data, such as information about the current flight conditions and surrounding environment. The information is passed to the teacher, who generates the desired response of the SL system, for example, the optimal trajectory of the UAV [1]. The system takes the input data and tries to reproduce the desired response. The actual UAV response is then compared with the desired one, and the difference between them (error) is used to adjust the ML algorithms. In the context of UAV operation, this concept uses data about the current flight conditions and surrounding environment to generate and adjust the optimal flight trajectory.

Unsupervised learning (UL) is performed on unlabeled data, where the model must independently identify hidden structures (Figure 2).

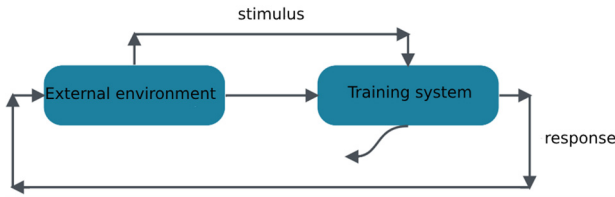


Figure 2. Unsupervised learning scheme
Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

The external environment provides stimuli that enter the UL system. It analyzes these stimuli, identifying structures and patterns in the data without predetermined responses [2]. Based on this, the system generates a response that affects the external environment, creating a new stimulus. UL allows the UAV to function effectively in complex and dynamic conditions without the need to predetermine all possible scenarios.

Reinforcement learning (RL) is the agent interacts with the OS, receiving rewards or penalties for its actions (Figure 3).

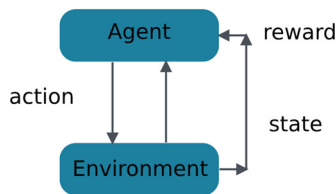


Figure 3. Reinforcement learning scheme
Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

Reward is a numerical value that reflects the success or failure of an agent's actions in a given situation. In the RL process, an agent representing a UAV control system selects an action (a_t) based on the current state of the environment (s_t).

It changes the state of the environment, which is recorded [3]. After that, the agent receives reinforcement, which is understood as a feedback signal. It can be positive (reward) or negative (penalty) and depends on how effectively the action is performed.

The implementation of ML algorithm concepts ensures a high degree of adaptation and accuracy in UAV control [4]. This allows analyzing and processing data in real time, optimizing flight trajectories and making autonomous decisions in

complex and changing conditions. To understand the specifics of ML application, it is necessary to study the classification of UAVs by their capabilities, design features and technological characteristics.

2.2. UAVs and Their Classification

Unmanned aerial vehicles (UAVs), or drones, are aircraft systems that operate without the direct participation of a pilot on board. These vehicles are controlled remotely by an operator or autonomously using onboard computers and sensors. The global UAV market was valued at US\$ 37.46 billion in 2023 and is expected to grow to US\$ 148.19 billion by 2032, with a compound annual growth rate of 16.5% from 2024 to 2032. Figure 4 presents the distribution of UAV applications across various industries in 2023 based on current market data.

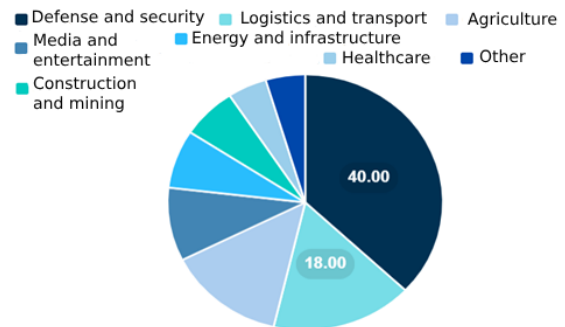


Figure 4. Distribution of UAVs by industries worldwide in 2023, %
Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

UAVs are classified by purpose into three main categories: military, civil and scientific. Military drones are used for reconnaissance, surveillance, target designation and combat operations. Civil drones are used for commercial and private purposes, such as aerial photography, delivery of goods and monitoring of agricultural lands. Scientific and research drones are designed to monitor the environment, study atmospheric phenomena and collect data [5].

UAVs are classified by design into three main categories. Multi-rotors (multicopters) are equipped with several rotors, providing high maneuver-

ability and flight stability, which makes them ideal for aerial photography and video filming [6]. Airplanes have fixed wings, allowing them to fly efficiently over long distances at high speed, and are used for long-term surveillance and monitoring

missions. Hybrid devices combine elements of multicopters and aircraft, providing high maneuverability and the ability to fly long distances. Based on size and weight, UAVs can be classified into several categories (Table 1).

Table 1

Classification of UAVs by size and weight

UAV type	Weight	Main areas of application
Micro UAV	Up to 250 g	Research in limited spaces, observation
Very small UAVs	250 g – 2 kg	Aerial photography, light commercial use
Small UAVs	2–25 kg	Agricultural monitoring, infrastructure inspections, commercial applications
Medium sized UAVs	25–150 kg	Military and commercial purposes, long-term surveillance and data collection missions
Large UAVs	More than 150 kg	Large-scale military operations, high-load commercial missions

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova

The operation of the UAV includes three main phases:

- **Navigation** is the process of collecting and analyzing information about the environment, which is necessary for constructing routes and avoiding obstacles [7].

- **Control** includes solving flight problems and ensuring the execution of planned routes.

- **Tracking** is the assessment of the current location of the UAV and adjusting the route as necessary.

The classification of UAVs demonstrates that these aviation systems can be effectively used in

various industries due to their ability to perform a wide range of tasks. Adaptive control of the UAV trajectory, using ML methods, plays an important role in their ability to function effectively at all phases of operation.

2.3. Adaptive Control of the UAV Trajectory

To ensure autonomous flight in conditions of uncertainty of the environment, it is necessary for the system to be able to respond to changes and adjust the trajectory in real time. Control of UAVs in conditions of uncertainty is associated with many factors (Table 2).

Table 2

Factors associated with UAV control under uncertainty

Factor	Description	Impact on UAV control
Changing weather conditions	Wind speed and direction, temperature, humidity, pressure	May affect flight stability, require trajectory correction
Presence of obstacles	Static and dynamic obstacles such as buildings, trees, birds	Constant monitoring is required to avoid collisions
OS Dynamics	Changes in landscape, moving objects, other UAVs	Requires flexibility in route planning and adaptation
Communication instability	Communication with the operator is disrupted, interference in data transmission channels	May lead to loss of control and management
Limited computing resources	Insufficient data processing capabilities of onboard computers	Limits the complexity of algorithms and their speed of operation
Low energy reserves	Short flight times, need to conserve energy	Requires route optimization and energy management
Data uncertainty	Inaccuracies and errors in data received from sensors	Can lead to errors in decision making and management
Route complexity	Includes the need to navigate routes in complex and unfamiliar areas	Requires high precision and reliability in planning and execution

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova [8; 9]

Effective UAV control requires a system that can analyze sensor data and predict potential changes. Sensors collect information about wind speed, temperature, pressure, and the presence of obstacles, and machine learning algorithms process this data to adjust the trajectory. The use of such technologies allows us to identify complex dependencies and predict changes more accurately.

2.4. Theoretical Approaches to the Application of ML for UAV Control

The main tasks solved by ML in the UAV control system are:

- **Pattern recognition:** using ML algorithms to analyze visual data, which helps the UAV to identify objects and obstacles in the environment [10].
- **Route optimization:** using ML to find the most efficient and safe flight paths, which minimizes time and energy costs.
- **Threat prediction and prevention:** using ML models to predict potential risks and develop strategies to prevent them, ensuring flight safety.
- **Improving interaction with operators:** implementing ML to improve the quality of commu-

nication and coordination between UAVs and their operators, which contributes to more effective control and monitoring [11].

The implementation of ML requires comprehensive strategies. Various theoretical approaches to the application of ML, such as different learning options, neural networks, ensemble learning and probabilistic models, play a significant role in the development and improvement of UAV control technologies (Table 3).

The application of ML theoretical approaches to UAV control provides many benefits, such as improving the adaptability, accuracy, and efficiency of these systems. The use of methods including reinforcement learning, neural networks, ensemble learning, and probabilistic models allows for the creation of more autonomous and robust systems that can cope with uncertainty and complex conditions [14]. These approaches not only improve the functionality and safety of UAVs, but also open up new prospects for their application in various fields, from military operations to civil and commercial tasks.

Table 3

Theoretical approaches to the use of ML for UAV control

Approach	Application	Advantages	Disadvantages
Neural networks capable of nonlinear data processing	Object recognition, image processing	High accuracy, big data capability	The need for large amounts of data for training
Ensemble learning (multiple models)	Improving classification accuracy	Increased stability	High computational costs
Probabilistic models for accounting for uncertainty in data	Forecasting and risk assessment, data processing	Accounting for uncertainty, improved interpretability	Difficulty in building and setting up models

Source: made by A.S. Ermilov, O.A. Saltykova from [12; 13]

3. Results and discussions

3.1. Application of ML for Forecasting and Optimization of Mathematical Models of UAV Trajectory Control

One of the main models used to describe the UAV flight dynamics is the **system of differential equations (1)**:

$$\dot{x} = f(x, u, w, t), \quad (1)$$

where x is the state vector, including the coordinates, speeds and orientation of the UAV; u is the

vector of control actions; w is the vector of disturbances, such as wind and turbulence; t is time.

The function f describes the dynamic behavior of the system. Using a system of differential equations to describe the UAV flight dynamics allows us to accurately model and predict their behavior under various conditions, taking into account the coordinates, speeds, orientation, control actions and external disturbances, such as wind and turbulence [15].

ML methods, such as neural networks, are used to approximate the function f , allowing us to

model complex dependencies in the data [16]. For example, **recurrent neural networks (RNN)** can model the temporal dynamics of the system using formula (2):

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_t &= \sigma_h(\mathbf{W}_h \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_h \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_h); \\ \mathbf{y}_t &= \sigma_y(\mathbf{W}_y \mathbf{h}_t + \mathbf{b}_y), \end{aligned} \quad (2)$$

where $\mathbf{h}_t$ is hidden state of the network at a given time t ; $\mathbf{x}_t$ — input data at time t ; $\mathbf{W}_h, \mathbf{W}_y$ — weight matrices; $\mathbf{b}_h, \mathbf{b}_y$ — response; σ_h, σ_y — activation functions such as sigmoid or ReLU. Sigmoid and ReLU (Rectified Linear Unit) are activation functions used in neural networks to introduce nonlinearity into the model. They allow the network to learn and model complex nonlinear dependencies in the data. For UAVs, this means that ML methods model complex dependencies between the data and the temporal dynamics of the system [17].

Long Short-Term Memory (LSTM) networks, owing to built-in mechanisms for forgetting and remembering information, are able to retain important data for long periods and ignore irrelevant ones. This allows them to effectively predict future system behavior based on past data, which is necessary for adjusting the UAV flight path in changing conditions [18]. The networks process sequential data, such as weather conditions, and help the system adapt to changes in real time.

The use of ML in UAV trajectory control significantly increases their autonomy and efficiency. The use of differential equation systems, recurrent neural networks and networks with long short-term memory allows not only to improve control accuracy, but also to significantly reduce the risks associated with the uncertainty of the OS [19]. This opens up new opportunities for the creation of highly efficient and safe unmanned systems capable of performing complex tasks.

3.2. Practice in the Application of ML for Forecasting and Optimizing UAV Trajectories

Examples of successful application of ML in UAV control can be found among both Russian and foreign companies. The Russian company Kronstadt specializes in the development and pro-

duction of high-tech solutions in the field of UAVs, shipbuilding, robotics and simulators. It offers complex control systems for military and civil aviation, maritime transport and other areas. Kronstadt actively participates in innovative projects, introducing advanced technologies and ensuring high reliability and efficiency of its products. The share of innovative developments in the manufactured products is 90%.

The American company Northrop Grumman uses advanced AI and ML solutions to create complex systems that support the execution of important tasks in the field of national security. These technologies improve the quality of decision-making, providing faster and more accurate data processing at the tactical level [20]. Northrop Grumman is implementing AI algorithms for vertical takeoff and landing, which allows them to be used in expeditionary conditions with minimal logistics and maintenance requirements. These systems can be quickly deployed and operated by a small team, which increases their tactical flexibility and effectiveness in combat conditions.

The American company General Atomics Aeronautical Systems, Inc. (GA-ASI) is one of the leading American manufacturers of military UAVs. Well-known models produced by this company are the MQ-9 Reaper, Gray Eagle and Predator C Avenger. These drones are widely used to perform reconnaissance tasks, as well as to carry out combat missions. ML is used to analyze large amounts of data in real time, which improves target recognition and decision making [21]. Adaptive control provides a high degree of autonomy for drones, allowing them to independently adjust their actions depending on changing conditions on the battlefield. Despite the fact that legal regulation of the use of UAVs is becoming more stringent in various countries, this direction remains promising. Strengthening requirements for flight safety and data protection stimulates the development of more advanced UAV control technologies, including the use of ML. Regulatory changes are aimed at ensuring the safe integration of UAVs into national airspace, which opens up new opportunities for developers and users of these technologies.

Conclusion

The use of ML for adaptive control of UAVs in uncertain conditions represents a significant step forward in ensuring the accuracy and safety of flights. The use of advanced ML algorithms allows for the efficient processing and analysis of data in real time, which facilitates timely correction of trajectories. This is especially important for complex missions in various fields, such as military affairs, civil and scientific research. The introduction of ML technologies opens up new opportunities for increasing the autonomy and efficiency of UAVs. Despite the tightening of legal regulation, innovative developments in the field of ML continue to evolve, offering improved algorithms and models for data processing and decision-making. Prospects for the development of ML in UAVs include the creation of more complex systems for collective control, which allows for the coordination of actions of several UAVs in a single network. This facilitates the implementation of complex tasks, such as joint survey of territories and synchronized response to emergency situations, significantly expanding the functionality of UAVs and increasing their operational flexibility.

References

1. Obukhov AD, Nazarova AO. A control method based on computer vision and machine learning technologies for adaptive systems. *Mechatronics, Automation, Control*. 2023; 24(1):14–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/mau.24.14-23> EDN: YZTOPE
2. Davletov AR. Modern machine learning methods and OCR technology for document processing automation. *Bulletin of Science*. 2023;10(67):677–697. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2712-8849-2023-1067-676-698> EDN: OZQMOC
3. Andrievsky BR, Popov AM, Mikhailov VA, Popov FA. Application of artificial intelligence methods for UAV flight control. *Aerospace Engineering and Technology*. 2023;1(2):72–107. (In Russ.) EDN: CLGVYM
4. Alam MM, Moh S. Joint Trajectory Control, Frequency Allocation, and Routing for UAV Swarm Networks: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024;23(12). <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3403890>
5. Davletov AR. The main difficulties in integrating machine learning into commercial operation. *Innovation & Investment*. 2023;(10):335–339. (In Russ.) EDN: UBCPOX
6. Xiao Y. Machine learning-based design of a linear self-resistant attitude control system for UAV string level. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024;9(1): 1–24. <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.01320> EDN: MTBMZX
7. Perrusquía A, Guo W, Fraser B, Wei Z. Uncovering drone intentions using control physics informed machine learning. *Communications Engineering*. 2024;3(1):1–26. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3127372/v1>
8. Kazakov LN, Kubyshkin EP, Paley DE. Construction of an adaptive motion control system optimal information exchange scheme for a group of unmanned aerial vehicle. *Modeling and Analysis of Information Systems*. 2023; 30(1):16–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-1-16-26> EDN: TOCUAE
9. Tomakova RA, Pilist SA, Brezhneva AN, Gorbachev IN, Zaikin YO. Method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring the fire situation in order to detect the source of ignition early. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(1):93–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-93-110> EDN: COTWER
10. Sembiring J, Sasongko RA, Bastian EI, Raditya BA, Limansubroto RE. A Deep Learning Approach for Trajectory Control of Tilt-Rotor UAV. *Aerospace*. 2024;11(1):96. <https://doi.org/10.3390/aerospace11010096> EDN: CDJAEF
11. Tang J, Xie N, Li K, Liang Ya, Chen X. Trajectory Tracking Control for Fixed-Wing UAV Based on DDPG. *Journal of Aerospace Engineering*. 2024;37(3):04024012. <https://doi.org/10.1061/JAEEZ.ASENG-528> EDN: JHDCBC
12. Kulida EL, Lebedev VG. Problems in the application of machine learning methods in aviation. *Management of the Development of Large-Scale Systems (MLSD'2023). Proceedings of the XVI International Conference, Moscow, September 26–28, 2023*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, 2023;1315–1321. (In Russ.) <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1315> EDN: RHPWHH
13. Malygin DS. Microservice architecture in cloud systems: risks and application opportunities in 2024–2030. *Modeling, optimization and information technology*. 2024; 12(2):29. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.029> EDN: JGOZIT
14. Han X, Zhao X, Xu X, Mei C, Xing W, Wang X. Trajectory tracking control for underactuated autonomous vehicles via adaptive dynamic programming. *Journal of the Franklin Institute*. 2024;361(1):474–488. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.12.003> EDN: HEEQAV
15. Fagundes-Junior LA, de Carvalho KB, Ferreira RS, Brandão AS. Machine Learning for Unmanned Aerial Vehicles Navigation: An Overview. *SN Computer Science*. 2024;5(2):1–26. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02592-5> EDN: MXAHWC

16. Lezhankin BV, Erokhin VV, Malisov NP. Control of the flight path of an unmanned aerial vehicle with different configurations of navigation information sources. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2024;(1):113–127. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2024_1_113 EDN: NSRDTA

17. Haque E, Hasan K, Ahmed I, Alam MS, Islam T. Towards an Interpretable AI Framework for Advanced Classification of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2024. p. 644–645. <https://doi.org/10.1109/CCNC51664.2024.10454862>

18. Castro GGR, Berger GS, Cantieri A, Teixeira MAS, Lima J, Pereira AI, Pinto MF. Adaptive path planning for fusing rapidly exploring random trees and deep reinforcement learning in an agriculture dynamic environment UAVs. *Agriculture*. 2023;13(2):354. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020354> EDN: KEROLZ

19. Artemov A. Programming languages in data engineering: overview, trends and practical application. *Innovation Science*. 2023;10–2:9–13. EDN: LLGVKL

20. Artyomov AA. Datacontract in analytical systems: basic principles, practical benefits and implementation methods. *Bulletin of Science*. 2023;12(69):800–812. (In Russ.) EDN: HUTTTS

21. Sahani SK, Sah AK, Jha A, Sahani K. Analytical Frameworks: Differential Equations in Aerospace Engineering. *ALSYSTECH Journal of Education Technology*. 2024;2(1):13–30. <https://doi.org/10.58578/alsystech.v2i1.2267> EDN: NWEDOP

Список литературы

1. Обухов А.Д., Назарова А.О. Метод управления на основе технологий компьютерного зрения и машинного обучения для адаптивных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. № 1. С. 14–23. <https://doi.org/10.17587/mau.24.14-23> EDN: YZTOPE

2. Давлетов А.Р. Современные методы машинного обучения и технология OCR для автоматизации обработки документов // Вестник науки. 2023. № 10 (67). С. 677–697. <https://doi.org/10.24412/2712-8849-2023-1067-676-698> EDN: OZQMOC

3. Андриевский Б.Р., Попов А.М., Михайлов В.А., Попов Ф.А. Применение методов искусственного интеллекта для управления полетом беспилотных летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 2. С. 72–107. EDN: CLGVYM

4. Alam M.M., Moh S. Joint Trajectory Control, Frequency Allocation, and Routing for UAV Swarm Networks: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23. No. 12. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3403890>

5. Давлетов А.Р. Главные трудности при интеграции машинного обучения в коммерческую эксплуатацию // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 335–339. EDN: UBCPOX

6. Xiao Y. Machine learning-based design of a linear self-resistant attitude control system for UAV string level // *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Vol. 9. Issue 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.01320> EDN: MTBMZX

7. Perrusquía A., Guo W., Fraser B., Wei Z. Uncovering drone intentions using control physics informed machine learning // *Communications Engineering*. 2024. Vol. 3. Issue 1. P. 1–26. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs.3127372/v1>

8. Казаков Л.Н., Кубышкин Е.П., Палей Д.Э. Построение оптимальной схемы информационного обмена системы адаптивного управления движением группы беспилотных летательных аппаратов // Моделирование и анализ информационных систем. 2023. Т. 30. № 1. С. 16–26. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-1-16-26> EDN: TOCUAE

9. Томакова Р.А., Филист С.А., Брежнева А.Н., Горбачев И.Н., Заикин Я.О. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13. № 1. С. 93–110. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-93-110> EDN: COTWER

10. Sembiring J., Sasongko R.A., Bastian E.I., Raditya B.A., Limansubroto R.E. A Deep Learning Approach for Trajectory Control of Tilt-Rotor UAV // *Aerospace*. 2024. Vol. 11. No 1. P. 96. <https://doi.org/10.3390/aerospace11010096> EDN: CDJAEF

11. Tang J., Xie N., Li K., Liang Ya., Chen X. Trajectory Tracking Control for Fixed-Wing UAV Based on DDPG // *Journal of Aerospace Engineering*. 2024. Vol. 37. Issue 3. Article no. 04024012. <https://doi.org/10.1061/JAEEZ.ASENG-528> EDN: JHDCBC

12. Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Проблемы при применении методов машинного обучения в авиации // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : труды XVI Международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2023 года. Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. С. 1315–1321. <https://doi.org/10.25728/mlsd.2023.1315> EDN: RHPWHH

13. Малыгин Д.С. Микросервисная архитектура в облачных системах: риски и возможности применения в 2024–2030 гг. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 2. С. 29. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.029> EDN: JGOZIT

14. Han X., Zhao X., Xu X., Mei C., Xing W., Wang X. Trajectory tracking control for underactuated autonomous vehicles via adaptive dynamic programming // *Journal of the Franklin Institute*. 2024. Vol. 361. No 1. P. 474–488. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.12.003> EDN: HEEQAV
15. Fagundes-Junior L.A., de Carvalho K.B., Ferreira R.S., Brandão A.S. Machine Learning for Unmanned Aerial Vehicles Navigation: An Overview // *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. No. 2. P. 1–26. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02592-5> EDN: MXAHWC
16. Лежанкин Б.В., Ерохин В.В., Малисов Н.П. Управление траекторией полета беспилотного летательного аппарата при различной конфигурации источников навигационной информации // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2024. № 1. С. 113–127. https://doi.org/10.51955/2312-1327_2024_1_113 EDN: NSRDTA
17. Haque E., Hasan K., Ahmed I., Alam M.S., Islam T. Towards an Interpretable AI Framework for Advanced Classification of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // 2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2024. P. 644–645. <https://doi.org/10.1109/CCNC51664.2024.10454862>
18. Castro G.G.R., Berger G.S., Teixeira M.A.S., Cantieri A., Lima J., Pereira A.I., Pinto M.F. Adaptive path planning for fusing rapidly exploring random trees and deep reinforcement learning in an agriculture dynamic environment UAVs // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 354. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020354> EDN: KEROLZ
19. Artemov A. Programming languages in data engineering: overview, trends and practical application // *Innovation Science*. 2023;10-2:9–13. EDN: LLGVKL
20. Артемов А.А. Data contract в аналитических системах: основные принципы, практическая польза и методы реализации // *Вестник науки*. 2023. № 12 (69). С. 800–812. EDN: HUTTTS
21. Sahani S.K., Sah A.K., Jha A., Sahani K. Analytical Frameworks: Differential Equations in Aerospace Engineering // *ALSYSTECH Journal of Education Technology*. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 13–30. <https://doi.org/10.58578/alsystech.v2i1.2267> EDN: NWEDOP

About the authors

Alexander S. Ermilov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8696-5057, ORCID: 0009-0007-4549-172X; e-mail: eemilov-sasha@yandex.ru

Olga A. Saltykova, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3969-6707; ORCID: 0000-0002-3880-6662; e-mail: saltykova-oa@rudn.ru

Сведения об авторах

Ермилов Александр Сергеевич, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8696-5057, ORCID: 0009-0007-4549-172X; e-mail: eemilov-sasha@yandex.ru

Салтыкова Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 3969-6707, ORCID: 0000-0002-3880-6662; e-mail: saltykova-oa@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-17-27
EDN: JTTEWC

Research article / Научная статья

Development of a Time Domain Identification Algorithm with a Spectral Objective Function

Oleg N. Korsun^{a,b}✉, Moung Htang Om^b

^a State Scientific Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russian Federation

^b Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ marmotto@rambler.ru

Article history

Received: September 17, 2024

Revised: November 16, 2024

Accepted: December 10, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. A reliable method has been developed for identifying aerodynamic coefficients and systematic errors in the aircraft measuring system, using the advantages of frequency domain analysis. The parameter identification problem is formulated using maximum likelihood estimation method. The models of object and observation are formulated in time domain and the objective function is defined in frequency domain that is able to decouple the aircraft's response at different frequencies, effectively mitigating the impact of noise and potential non-linearities inherent in time-domain data. This transformation from time domain to frequency domain also facilitates the identification of delays in measurement system, which are often difficult to estimate accurately in the time domain. A modified Newton's method is employed to efficiently minimize the objective function in frequency domain, yielding optimal estimates for the lateral aerodynamic derivatives and delays. The effectiveness of this approach is validated through examples of identifying the parameters of a flight vehicle motion model, demonstrating its capability to accurately characterize lateral aircraft dynamics. This method provides a valuable tool for enhancing flight control system design and analysis by enabling more precise modeling of aircraft behavior.

Keywords: parameter identification, time-spectral algorithm, frequency domain, aerodynamic coefficients, on-board measurement errors

Authors' contribution:

Korsun O.N. — research concept, analysis of the data obtained; Om M.H. — collection and processing of materials, writing the text.

Acknowledgements

The authors express their deep appreciation to their teammates for passionate contributions that ensure the completion of this research work. The authors also gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which improved the presentation of the research work.

For citation:

Korsun ON, Om MH. Development of a time domain identification algorithm with a spectral objective function. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):17–27. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-17-27>



Разработка алгоритма идентификации во временной области со спектральной целевой функцией

О.Н. Корсун^{a,b} , М.Х. Ом^b 

^a Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Российская Федерация

^b Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

✉ marmotto@rambler.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 сентября 2024 г.

Доработана: 16 ноября 2024 г.

Принята к публикации: 10 декабря 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Разработан надежный метод определения аэродинамических коэффициентов и систематических ошибок в измерительной системе самолета, в котором используются преимущества анализа в частотной области. Задача определения параметров формулируется в рамках метода максимума правдоподобия. Модели объекта и наблюдения задаются во временной области, а функционал определяется в частотной области, что позволяет разделить динамические характеристики самолета на разных частотах, эффективно уменьшая влияние шума и потенциальных нелинейностей, присущих данным во временной области. Этот переход из временной области в частотную также облегчает определение задержек в измерительной системе, которые часто сложно точно оценить во временной области. Для минимизации целевой функции в частотной области применяется модифицированный метод Ньютона, что позволяет получить оптимальные оценки боковых аэродинамических коэффициентов и запаздываний. Эффективность данного подхода подтверждается примерами идентификации параметров модели движения летательного аппарата, демонстрируя его способность точно охарактеризовать боковую динамику самолета. Этот метод может стать эффективным инструментом для оптимизации проектирования и анализа систем управления полетом. Он дает возможность с высокой точностью моделировать поведение летательного аппарата.

Ключевые слова: идентификация параметров, спектрально-временной алгоритм, частотная область, аэродинамические коэффициенты, погрешности бортовых измерений

Вклад авторов:

Корсун О.Н. — концепция исследования, анализ полученных данных; Ом М.Х. — сбор и обработка материалов, написание текста

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность коллегам по команде за посильный вклад, обеспечивший завершение исследовательской работы. Авторы также выражают признательность рецензентам за полезные комментарии и предложения, которые повысили качество исследовательской работы.

Для цитирования:

Korsun O.N., Om M.H. Development of a time domain identification algorithm with a spectral objective function // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 17–27. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-17-27>

Introduction

Algorithms for the parameter identification of dynamic systems are traditionally divided into frequency- and time-domain methods, and each group of methods has its own advantages and disadvantages [1; 2]. Therefore, time-domain algorithms provide a simpler account of the nonlinearities and nonstationarities of an object, whereas frequency-domain algorithms allow for the selection of the most effective band of operating frequencies for a given task. Time and spectral domain parameter identification methods form an effective instrument for aircraft flight tests [3]. An example of spectral parameter identification was presented in [4]. In previous studies [5–8], the use of inputs in the frequency domain to augment the quality of identification estimates was discussed. Other fields where time- and frequency-domain identification play an important role are on-board measurement systematic error identification [9–11], aircraft thrust and drag force estimation [12; 13], satellite orbit parameter determination [14; 15], and analyses and improvement of piloting processes [16–19].

In recent years, there has been a trend towards the development of mixed time-frequency methods that aim to combine the advantages of both approaches.

As an example, one can cite the spectral-temporal identification method [20], in which the calculation of residuals between the experimentally measured and model-predicted signal values is performed in the time domain, whereas the minimized function is formulated in the frequency domain, specifically in the complex variable domain of the Laplace transform. The main limitation of this method is the requirement of linearity in the object and observation models. The proposed algorithm is free from this constraint and is based on a well-known method for identifying nonlinear nonstationary dynamic systems using the maximum likelihood approach [21]. Furthermore, a significant advantage of the proposed algorithm is its use of concepts familiar to engineering practice, such as frequency domains and spectral densities.

1. Time-Frequency Identification

The identification algorithm is obtained in which the models of the object and observations are formulated in the time domain, whereas the minimized functional is defined in the frequency domain. It is assumed that the new algorithm, while retaining the main properties of the original time-domain method, will acquire new beneficial qualities, primarily because of its ability to select bands of operating frequencies.

The nonlinear and nonstationary model of the object and observations are defined as follows:

$$y'(t) = f(y(t), a, t), \quad (1)$$

$$z(t_i) = h(y(t_i), a, t_i) + v(t_i). \quad (2)$$

where, $y(t)$, $z(t_i)$ is the state vector and observation vector with dimensions n and r respectively; a is the vector of the parameters that shall be identified with dimension p ; $v(t_i)$ is the vector random process of the white noise type of dimension r , having a normal distribution and a correlation matrix $R(t_i)$.

The control signal $u(t)$, is considered to be a known function of time and is accounted for by the time dependence on the right-hand side of (1). Observation equation (2) is defined for discrete time instants $t_i, i = 1, 2, \dots, N$, which corresponds to digital registration and processing.

Traditionally, the minimized functional in the time domain is formulated as follows:

$$J(a) = (1/N) \sum_{i=1}^N \left(z(t_i) - \hat{z}(t_i, a) \right)^T \times \\ \times R^{-1}(t_i) \left(z(t_i) - \hat{z}(t_i, a) \right), \quad (3)$$

where N is the number of observations; $\hat{z}(t_i, a)$ is the prediction of the observation vector, which is determined by the numerical integration of equations (1), (2) at $v(t_i) = 0$ for given initial conditions and at a fixed value of the parameter vector a .

Considering that the operation $(1/N) \sum_{i=1}^N (\cdot)$

corresponds to the estimate of the mean and is denoted by $\varepsilon(t_i, a)$ the residual between the observation and prediction:

$$\varepsilon(t_i, a) = z(t_i) - \hat{z}(t_i, a) \quad (4)$$

the functional (3) may be written in the form:

$$J(a) = \hat{M} \left[\varepsilon^T(t_i, a) R^{-1}(t_i) \varepsilon(t_i, a) \right], \quad (5)$$

where $\hat{M}[\cdot]$ is the estimate of the mean for N number of observations.

It is necessary to introduce several notations immediately before proceeding to the formulation of the functional in the frequency domain.

For a scalar signal $x(t)$, presented by N number of measurements of $x(t_i)$, $i=1, 2, \dots, N$ conducted at regular intervals $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ with the registration frequency $f_{\text{reg}} = 1/\Delta t$, let us denote $F(x(t))$ the result of the discrete Fourier transform [10], calculated for discrete values of frequencies $f(x)$, $k=1, 2, \dots, N/2+1$ within the frequency band $0 \dots 0.5 f_{\text{reg}}$.

Let us denote $F_k(x(t))$, the component of $F(x(t))$, corresponding to the frequency f_k . In the case of a vector signal

$$x(t) = [x_1(t) x_2(t), \dots, x_r(t)]^T,$$

the discrete transformation is applied separately to each component, and $F_k(x(t))$ represents a vector of the same dimension.

$$F_k(x(t)) = [F_k(x_1(t)) F_k(x_2(t)), \dots, F_k(x_r(t))]^T.$$

For the scalar signal $x(t)$ described above, at each discrete frequency value f_k the estimate of the spectral density of the power flux $\hat{S}_k(x(t))$ is denoted as [10]:

$$\hat{S}_k(x(t)) = \hat{M} \left[F_k^*(x(t)) F_k(x(t)) \right]. \quad (6)$$

Methods for numerically determining the estimate of mean in for (6) for N number of measured values of $x(t_i)$ are presented, for instance, in [22].

It is now possible to proceed to the formulation of the functional and derivation of the algorithm.

The following assumption is made: the object model and observation model are defined by the equations (1) and (2). The functional in the frequency domain can be defined as follows:

$$J_f(a) = \hat{M} \left[\sum_{k=1}^L F_k^*(\varepsilon(t, a)) G_k F_k(\varepsilon(t, a)) \right], \quad (7)$$

where $\varepsilon(t, a)$ is the vector of residual with dimension r between observation and prediction, calculated by formula (4); G_k is the diagonal matrix of real dimensional weight coefficients with dimension $r \times r$.

Substituting into (7)

$$G_k = \text{diag}[g_{k1} \ g_{k2} \ , \dots, \ g_{kr}],$$

equation (6, 8) can be obtained in the form:

$$J_f(a) = \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^r g_{kj} \hat{S}_k(\varepsilon_j(t, a)). \quad (8)$$

From (8), considering (6), it follows that functional (7) with the specified choice of the weight matrix G_k is real-valued, although it contains complex components $F_k(\varepsilon(t, a))$.

A recurrent algorithm for finding an estimate of the vector of parameters $\hat{a}$ minimizing the functional (7) is obtained as a modification of Newton's method [21]:

$$\hat{a}_{k+1} = \hat{a}_k - (D(\hat{a}_k))^{-1} \frac{dJ_f(\hat{a}_k)}{d\hat{a}_k}, \quad (9)$$

where, $\frac{dJ_f(\hat{a}_k)}{d\hat{a}_k}$ is a vector with the dimension p of the first derivatives of the functional with

respect to the vector of parameters; $D(\hat{a}_k)$ is a matrix with dimension $p \times p$, approximately equal to the matrix of the second derivatives of the functional with respect to the vector of parameters.

We will examine the matrix $D(\hat{a}_k)$ in more detail during the derivation of the algorithm. It is important to note that the distinction between the recurrent algorithm (9) and classical Newton method lies in the way it is computed. To implement (9), it is necessary to determine the first- and second-order derivatives of the functional (7) with respect to the vector parameters that should be identified. In the differentiation process, we utilize the linearity property of the expectation operators, differentiation, and Fourier transforms, along with the following formula:

$$\frac{d(x^*(a)Gx(a))}{da} = 2\text{Re}\left[\frac{dx^*(a)}{da}Gx(a)\right], \quad (10)$$

where G is a valid diagonal matrix; $x(a)$ is a complex vector that is a function of a valid vector argument a .

The equation (10) is obtained by differentiating the left side, where the elements of the vector $x(a)$ and matrix G can be written explicitly. The derivative of the quadratic form is $x^*(a)Gx(a)$.

It is assumed that $x(a)$ is a complex vector of dimension n , which is a function of the valid vector argument a of dimension p ;

G is a diagonal real-dimensional matrix of the weight coefficients of the dimension $n \times n$, $G = \text{diag}(g_1 \ g_2, \dots, g_n)$.

Let us demonstrate, that the derivative of quadratic form by vector a

$$\frac{d(x^*(a)Gx(a))}{da} = 2\text{Re}\left[\frac{dx^*(a)}{da}G_{(n \times n)}x(a)_{(n \times 1)}\right].$$

Writing out the elements of the vectors explicitly,

$$\begin{aligned} x^*(a)Gx(a) &= g_1 x_1^*(a)x_1(a) + \\ &+ g_2 x_2^*(a)x_2(a) + \dots + g_n x_n^*(a)x_n(a). \end{aligned}$$

In order to proceed, it is necessary to determine the derivative of the summand of the form included in the resulting expression, $g_i x_i^*(a)x_i(a)$:

$$\begin{aligned} g_i \frac{d(x_i^*(a)x_i(a))}{da} &= g_i \left(\frac{dx_i^*(a)}{da} x_i(a) + x_i^*(a) \frac{dx_i(a)}{da} \right) = \\ &= g_i \left(\frac{dx_i^*(a)}{da} x_i(a) + \left(\frac{dx_i^*(a)}{da} x_i(a) \right)^* \right) = \\ &= 2 g_i \text{Re} \left[\frac{dx_i^*(a)}{da} x_i(a) \right]. \end{aligned}$$

Let us find the desired derivative using the following result:

$$\begin{aligned} \frac{d(x^*(a)Gx(a))}{da} &= \frac{d}{da} \left[\sum_{i=1}^n g_i x_i^*(a)x_i(a) \right] = \\ &= 2\text{Re} \left[g_1 \frac{dx_1^*(a)}{da} x_1(a) + g_2 \frac{dx_2^*(a)}{da} x_2(a) + \dots + g_n \frac{dx_n^*(a)}{da} x_n(a) \right] = \\ &= 2\text{Re} \left[\begin{bmatrix} \frac{dx_1^*(a)}{da} & \frac{dx_2^*(a)}{da} & \dots & \frac{dx_n^*(a)}{da} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(a) \\ x_2(a) \\ \dots \\ x_n(a) \end{bmatrix} \right] = \\ &= 2\text{Re} \left[\frac{dx^*(a)}{da} G_{(n \times n)} x(a)_{(n \times 1)} \right]. \end{aligned}$$

Thus, the equation (10) is proven.

It is necessary now to find the first derivative of functional (7):

$$\begin{aligned} \frac{dJ_f(a)}{da} &= \hat{M} \left[\sum_{k=1}^L 2\text{Re} \left\{ F_k^* \left(\frac{d\varepsilon(t,a)}{da} \right) G_k F_k(\varepsilon(t,a)) \right\} \right] = \\ &= -2\hat{M} \left[\sum_{k=1}^L \text{Re} \left\{ F_k^* \left(\frac{d\hat{z}(t,a)}{da} \right) G_k F_k(\varepsilon(t,a)) \right\} \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

Note that in the second equation (11), the expression (4) is used for the residual $\varepsilon(t,a)$.

In the special case, for $G_k = E$ the derivative (11) takes the form:

$$\frac{dJ_f(a)}{da} = -2\text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^L \hat{S}_k \left(\frac{d\hat{z}(t,a)}{da}, \varepsilon(t,a) \right) \right\}, \quad (12)$$

$$\text{where, } \hat{S}_k \left(\frac{d\hat{z}(t,a)}{da}, \varepsilon(t,a) \right) = \hat{M} \left[F_k^* \left(\frac{d\hat{z}(t,a)}{da} \right) F_k(\varepsilon(t,a)) \right],$$

there is an estimate of the cross-spectral density of signals $d\hat{z}(t, a)/da$ and $\varepsilon(t, a)$ is calculated from N values of these signals recorded at discrete time points t_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

More generally, after substituting $G_k = \text{diag}[g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kr}]$ into (11), equation (13) will be obtained:

$$\frac{dJ_f(a)}{da} = -2\text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^L \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i1, i) g_{ki} \\ \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i2, i) g_{ki} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(ip, i) g_{ki} \end{bmatrix} \right\}, \quad (13)$$

where, $\hat{S}_k(ij, i)$ is the estimate of the cross-spectral density of the signal corresponding to the i -th row of the j -th column of the matrix $d\hat{z}(t, a)/da$ (i.e., the signal of the derivative of the i -th element of the vector of observation prediction $\hat{z}(t, a)$ with respect to the j -th element of the vector of parameters a) and the i -th element of the vector of the residual $\varepsilon(t, a)$.

As can be observed, and in this case, finding the first derivative is reduced to calculating the cross-spectral densities.

Then, it is necessary to approximate the second by derivation differentiating (11) using the vector of parameters a :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J_f(a)}{da^2} &= \frac{d}{da} \left[\frac{dJ_f(a)}{da} \right] = \\ &= -2\text{Re} \left\{ \hat{M} \left[\sum_{k=1}^L F_k^* \left(\frac{d^2 \hat{z}(t, a)}{da^2} \right) \right] G_k F_k(\varepsilon(t, a)) \right\} + \\ &+ 2\text{Re} \left\{ \hat{M} \left[\sum_{k=1}^L F_k^* \left(\frac{d\hat{z}(t, a)}{da} \right) G_k F_k \left(\frac{d\hat{z}(t, a)}{da} \right) \right] \right\} \approx \\ &\approx 2\text{Re} \left\{ \hat{M} \left[\sum_{k=1}^L F_k^* \left(\frac{d\hat{z}(t, a)}{da} G_k F_k \left(\frac{d\hat{z}(t, a)}{da} \right) \right) \right] \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

In equation (14), the term containing the prediction of the second derivatives with respect to the parameter vector has been omitted. This reduces the computational burden and eliminates errors associated with calculating the second derivatives. The main idea is that near the extremum, the omitted term is small because it is proportional to the residual $\varepsilon(t, a)$, and far from the extremum, its influence on the convergence of the algorithm is not decisive.

When $G_k = E$, from equation (14), the following equation (15) will be obtained:

$$\frac{d^2 J_f(a)}{da^2} \approx 2\text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^L \hat{S}_k \left(\frac{d\hat{z}^T(t, a)}{da}, \frac{d\hat{z}(t, a)}{da} \right) \right\}, \quad (15)$$

where, under the sign of the sum, there is an estimate of the cross-spectral density of the signals $d\hat{z}(t, a)/da$.

By substituting $G_k = \text{diag}[g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kr}]$ into (14), equation (16) will be obtained as follows:

$$\frac{d^2 J_f(a)}{da^2} \approx 2\text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^L \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i1, i1) g_{ki} & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i1, i2) g_{ki} & \dots & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i1, ip) g_{ki} \\ \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i2, i1) g_{ki} & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i2, i2) g_{ki} & \dots & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(i2, ip) g_{ki} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(ip, i1) g_{ki} & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(ip, i2) g_{ki} & \dots & \sum_{i=1}^r \hat{S}_k(ip, ip) g_{ki} \end{bmatrix} \right\}. \quad (16)$$

The term $\hat{S}_k(ij, in)$ represents an estimate of the cross-spectral density between the derivative of the i -th element of the prediction vector with respect to the j -th element of the parameter vector, and the derivative of the i -th element of the prediction vector with respect to the n -th element of the parameter vector.

Thus, the final algorithm is as follows: the model of the object and observations is defined by equations (1) and (2), and the parameter estimates are computed using the recurrent formula (9), in which the first derivative of the functional is determined based on the form of the matrix G_k using formulas (12) or (13), whereas the approximate matrix of the second derivatives $D(\hat{a}_k)$ is given by formulas (15) or (16). Prior parameter estimates must be provided to initiate the algorithm. The

computations based on formula (9) are concluded when the magnitude of the vector $\hat{a}_{k+1} - \hat{a}_k$ becomes less than a certain small value, for example, 1 to 2% of the magnitude of the vector $\hat{a}_k$. The derivative of the forecast with respect to the parameters $d\hat{z}(t, a)/da$ is determined numerically by sequentially assigning small increments to each of the elements of the vector a .

The numerical estimation of the spectral and cross-spectral densities of the power flow is performed using one of the known methods. A number of practically effective algorithms are provided, for example, in [22]. In particular, this work used the Fast Fourier Transform, the Goodman-Otnes-Enokson spectral window, and frequency averaging, although other options are also possible.

The choice of operating frequency bands is based on the conditions of a specific problem by setting the coefficients of the matrix G_k or by excluding individual frequency components from the summation over $k=1, 2, \dots, L$. The latter method must be used when using simpler formulae correspond to $G_k = E$.

2. Identification of Lateral Aerodynamic Coefficients of an Aircraft Using Time-Frequency Identification Algorithm

This study considers the functionality of the proposed algorithm by means of examples of identifying the parameters of an aircraft motion model.

Example 1. Let us consider the lateral motion equations of an aircraft, which we will extract from the complete system of spatial motion equations:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} &= a_z \cos \beta - (a_x \sin \beta - \omega_y) \cos \alpha + (a_y \sin \beta + \omega_x) \sin \alpha; \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x \omega_z + q \frac{Sl}{J_y} m_y + (K_{\text{ЛВ}} \omega_z + (P_{\text{ПРАВ}} - P_{\text{ЛСВ}}) z_{\text{ЛВ}}) / J_y; \\ \frac{d\omega_x}{dt} &= \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y \omega_z + q \frac{Sl}{J_x} m_x; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_x - tg \nu (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \end{aligned} \quad (17)$$

where

$$a_x = qS(-c_x + c_p) / m - g \sin \nu;$$

$$a_y = qSc_y / m - g \cos \nu \cos \gamma;$$

$$a_z = qSc_z / m - g \cos \nu \sin \gamma.$$

The aerodynamic force and moment coefficients are generally defined using the following mathematical expressions:

$$\begin{aligned} c_z &= c_z^\beta \beta + c_z^{\delta_H} \delta_H; \\ m_x &= m_x^\beta \beta + m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y + m_x^{\delta_\alpha} \delta_\alpha + m_x^{\delta_H} \delta_H; \\ m_y &= m_y^\beta \beta + m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y + m_y^{\delta_\alpha} \delta_\alpha + m_y^{\delta_H} \delta_H. \end{aligned} \quad (18)$$

The normal, lateral, and longitudinal overloads were calculated using the following formulae:

$$\begin{aligned} n_y &= a_y / g + \cos \nu \cos \gamma; \\ n_z &= a_z / g + \cos \nu \sin \gamma; \\ n_x &= a_x / g + \sin \nu. \end{aligned} \quad (19)$$

This notation corresponds mainly to the generally accepted notation in flight dynamics. When performing lateral motion identification, the longitudinal motion parameters (angles of attack α , pitch angle J and pitch rate ω_z) are replaced with the measured values, and the parameter a_y is calculated from (19) using the measured values of the normal overload n_y . The changes in flight speed V and parameter a_x were considered similarly.

In order to obtain the initial data for identification, a straight and level flight was simulated. Relative to this straight and level flight, a series of aileron inputs to the left and right, lasting 1–2.5 s was performed. The duration of the identification section was 32 s, with a registration frequency of 8 Hz. For identification, the values of the angular velocities ω_x , ω_y and lateral load factor n_z , as well as the measurements of the input signal - aileron deflections δ_α , were used. The rudder was not deflected during the identification section, i.e. $\delta_H = 0$ was assumed. The amplitude of the aileron deflections was chosen so that the maximum deviations of the signals were ± 8 deg/s for $\omega_x \pm 1.7$ deg/s for $\omega_y \pm 0.08$ units of overload

for n_z . The measurement noises were modeled as discrete Gaussian random sequences of the white noise type with standard deviations of 0.08 deg/s for ω_x , 0.02 deg/s for ω_y , 0.02 units of overload for n_z , 0.02 deg/s for δ_y .

The entire volume of the simulated data was used for identification, that is, a section with a duration of 32 s. The coefficients of the aerodynamic forces and moments (18) in various combinations were selected as the parameters to be identified.

At the initial stage, the same input data were processed using the proposed algorithm and the traditional Maximum Likelihood Estimation (MLE) algorithm, with identical object and observation models and for the same set of parameters to be identified. In the frequency functional, summation was performed over the entire frequency band. In this case, the estimates obtained by both algorithms were nearly identical, with estimation errors not exceeding 2–3%. The results indicate that when models (1) and (2) correspond to the object

and measurement system with respect to the parameters to be identified, respectively, and the disturbance represents the aforementioned broadband noise that is uncorrelated with the useful signal, the use of the frequency functional does not provide advantages over the time method, and both algorithms are equivalent. Therefore, further research should focus on cases of disturbances that are correlated with the object's signals.

At the initial stage, it was also established that components with frequencies above 0.8 Hz do not have a significant impact on the parameter estimates, as they fall outside the object's pass band and correspond to noise. Therefore, in subsequent implementations of the algorithm with the frequency functional, these components were excluded from the summation process.

In the main stage, the identification of the roll channel parameters $m_x^{\delta y}$, $m_x^{\omega x}$ was considered as the first example, with the signal of angular velocity ω_x containing additive sinusoidal noise. The results are presented in Table 1.

Table 1

Relative errors of lateral aerodynamic moment coefficients identification

Frequency band for the calculation of functional, Hz	Relative errors of the estimates of parameters, %		Noise parameters		Standard criterion Cr, %
	$m_x^{\delta y}$	$m_x^{\omega x}$	Amplitude, Degree	Frequency, Hz	
0...0.8	9.6	7.1	3.0	0.5	16.3
0...0.33	3.2	1.7	3.0	0.5	0.42
0...0.24	0.1	0.12	3.0	0.5	0.001
0...0.8	6.1	14.0	3.0	0.2	17.7
0.24...0.8	1.4	9.7	3.0	0.2	3.9
0.33...0.8	0.25	4.9	3.0	0.2	0.67
0...0.8	8.7	15.1	4.0	0.1	24.2
0.33...0.8	1.4	3.8	4.0	0.1	0.61
0.42...0.8	1.39	0.2	4.0	0.1	0.32

Source: made by O.N. Korsun and M.H. Om

The relative errors in the parameter estimation are presented in Columns 2 and 3 of the Table 1. The table indicates that the presence of noise leads to an increase in the estimation errors of the parameters when calculating the functional across the entire frequency band of the object (0–0.8 Hz). The errors decrease significantly when calculating

the functional within a band that does not contain noise.

To select frequency bands effectively, a criterion that allows for the comparison of different options is required. In this study, the following normalized criterion was used, with the values presented in the last column of the Table:

$$Cr = \frac{\sum_{k=1}^L (\hat{S}_k(\varepsilon_1(t,a)) + \hat{S}_k(\varepsilon_2(t,a)) + \dots + \hat{S}_k(\varepsilon_r(t,a))) \cdot 100\%}{\sum_{k=1}^L (\hat{S}_k(\hat{z}_1(t,a)) + \hat{S}_k(\hat{z}_2(t,a)) + \dots + \hat{S}_k(\hat{z}_r(t,a)))} \quad (20)$$

In formula (20), the numerator contains estimates of the spectral densities of the residuals for each component r of the measurement vector, whereas the denominator includes estimates of the spectral densities of the components of the prediction vector. The summation in (20) is performed over the frequency components belonging to the frequency band used in the functional calculation. Criterion (20) is proportional to the ratio of the powers of the residual and the output signal within the frequency band utilized for identification.

Table 1 shows that, as the accuracy of the estimates increases, the value of the criterion decreases. In the identification of the roll channel parameters, it was assumed that the other parameters of lateral motion (18) were known exactly. Now, let us assume that they are known with errors, and assess the possibility of isolated identification of the roll channel parameters.

We introduced 30% errors in the parameters $m_x^\beta, m_x^{\omega_y}, m_y^{\omega_y}, m_y^{\omega_x}, c_z^\beta$ and identified the roll channel.

The results presented in Table 2 show that the transition to the relatively high-frequency band significantly reduced the estimation errors.

3. Identification of the Errors of the Measurement System from the Flight Experiment Data

Example 2. For the conditions in Example 1, consider another task. Suppose it is necessary to identify the errors of the measurement system from the flight experiment data, namely, the delays $\Delta T_{\omega_x}, \Delta T_{\omega_y}$ relative to the start time of the information frame for the angular velocity signals ω_x and ω_y . During the generation of the initial data, these delays were assumed to be equal to 1/2 of the sampling interval, that is, $\Delta T_{\omega_x} = \Delta T_{\omega_y} = 1/16$ s. The errors in specifying the aircraft model parameters were considered as noise. The results are presented in Table 3.

Table 2

Relative errors of lateral aerodynamic moment coefficients identification

Frequency band for the calculation of functional, Hz	Relative errors of the estimates of parameters, %		Type of error	Standard criterion Cr, %
	$m_x^{\delta_3}$	$m_x^{\omega_x}$		
0...0.8	7.5	16.7	Errors 30% for parameters $m_x^\beta, m_x^{\omega_y}, m_y^{\omega_y}, m_y^{\omega_x}, c_z^\beta$	4.65
0.33...0.8	3.4	4.0		0.24
0.42...0.8	3.3	2.7		0.025

Source: made by O.N. Korsun and M.H. Om

Table 3

Relative errors of identification estimates

Frequency band for the calculation of functional, Hz	Relative errors of the estimates of parameters, %		Type of noise	Standard criterion Cr, %
	ΔT_{ω_x}	ΔT_{ω_y}		
0...0.8	0.5	1.5	Without noise	0.012
0...0.8 0.33...0.8	2.5 4.2	50.2 0.5	Errors 30% for m_x^β	1.05 0.036
0...0.8 0.33...0.8 0.51...0.8	9.2 8.6 4.8	106.1 23 9.7	Errors 30% for $m_x^\beta, m_x^{\omega_y}, m_y^{\omega_y}$	0.88 0.054 0.035

Source: made by O.N. Korsun and M.H. Om

As we can see, in this case, the transition to the relatively high-frequency band also significantly reduces the influence of noise, and the comparison of options is facilitated by criterion (20). The advantages of the algorithm include the ability to select the operational frequency band, which substantially diminishes the impact of noise related to the useful signal, typically caused by inaccuracies or incompleteness of the model, neglect of coupled system models, and other problems mentioned in [23].

Conclusion

This study proposes an algorithm for the identification of dynamic systems, in which the nonlinear models of the object and observations are defined in the time domain, while the minimized functional is defined in the frequency domain. The algorithm offers a significant advantage by allowing for the selection of the operational frequency band. This capability greatly minimizes the interference from noise that can affect useful signals, which often arises from various factors such as model inaccuracies, incomplete data, and the neglect of coupled system interactions. By effectively targeting specific frequency ranges, the algorithm enhances signal clarity and reliability, making it a valuable tool in complex modeling scenarios. In contrast, traditional algorithms often lead to significant biases in parameter estimates due to such types of errors and noises. The effectiveness of the algorithm has been validated through examples of identifying the parameters of a flight vehicle motion model.

References

1. Klein V, Morelli EA. *Aircraft System Identification: Theory and Practice*. Reston: AIAA. 2006.
2. Jategaonkar RV. *Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology*. Reston, USA: AIAA, 2006.
3. Dorobantu D, Murch A, Mettler B, Balas G. System Identification for Small, Low-Cost, Fixed-Wing Unmanned Aircraft. *JA Aircraft*. 2013;50(4):1117–1130. <https://doi.org/10.2514/1.C032065>
4. Song Y, Song B, Seanor B, Napolitano MR. On-line Aircraft Parameter Identification Using Fourier Transform Regression with an Application to F/A-18 HARV Flight Data. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2002; 16(3):327–337. <https://doi.org/10.1007/BF03185230>
5. Grauer J, Boucher MJ. Aircraft System Identification from Multisine Inputs and Frequency Responses. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2020;43(12):2391–2398. <https://doi.org/10.2514/1.G005131> EDN: EGEDGU
6. Grauer J. An Interactive MATLAB Program for Fitting Transfer Functions to Frequency Responses. *Conference: AIAA Scitech 2021 Forum*. 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1426>
7. Grauer J, Morelli E. Method for Real-Time Frequency Response and Uncertainty Estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2013;37(1):336–344. <https://doi.org/10.2514/1.60795>
8. Morelli E. Optimal input design for aircraft stability and control flight testing. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2021;191(2–3):1–25. <https://doi.org/10.1007/s10957-021-01912-0> EDN: HOKNPU
9. Korsun ON, Poplavskii BK. Estimation of systematic errors of onboard measurement of angle of attack and sliding angle based on integration of data of satellite navigation system and identification of wind velocity. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2011; 50(1):130–143. <https://doi.org/10.1134/S1064230711010126> EDN: OHRCPT
10. Korsun ON, Nikolaev SV, Om MH. Detection of dynamic errors in aircraft flight data. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021;1027:012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012011> EDN: MWKAYM
11. Korsun ON, Nikolaev SV, Pushkov SG. Algorithm for estimating systematic measurement errors for air velocity, angle of attack, and sliding angle in flight-testing. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2016; 55(3):446–457. <https://doi.org/10.1134/S1064230716030114> EDN: WPIJVT
12. Korsun ON, Poplavsky BK, Prihodko SJu. Intelligent support for aircraft flight test data processing in problem of engine thrust estimation. *Procedia Computer Science*. 2017;103:82–87. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.017> EDN: XYADFJ
13. Korsun ON, Poplavsky BK, Om MH. Identification of the Engine Thrust Force Using Flight Test Data. In: Jing Z., Strelets D. (eds.). *Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2021. ICASSE 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer; 2021;849. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8154-7_30
14. Kozorez DA, Krasil'shchikov MN, Kruzhkov DM. Earth orientation parameters onboard refining at glonass high-orbit segment. *Russian Engineering Research*. 2022; 42(6):603–606. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22060144> EDN: EYQNLK
15. Krasilshchikov MN, Kruzhkov DM, Martynov EA. Predicting the parameters of the orientation of the

earth in problems of navigation taking into account the phenomenon of the development of irregularity in the earth's rotation. *Cosmic Research*. 2023;61(4): 324–332. <https://doi.org/10.1134/S0010952523220021> EDN: FDBHTA

16. Evdokimenkov V, Kim R, Krasilshchikov M, Sebrjakov G. Individually Adapted Neural Network for Pilot's Final Approach Actions Modeling. In: Cheng L, Liu Q, Ronzhin A. (eds.). *Advances in Neural Networks — ISNN 2016*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2016;9719. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40663-3_42 EDN: WURRCL

17. Efremov AV, Efremov EV, Shcherbakov AI. Suppression of pilot-induced oscillations of various categories using augmentation means. *Russian Aeronautics*. 2024; 67(1):33–42. <https://doi.org/10.3103/S1068799824010045> EDN: EGQYCR

18. Irgaleev IKh, Efremov AV, Grishina AYu, Efremov EV. Optimal control model as an approach to the synthesis of a supersonic transport control system. *Aerospace Systems*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s42401-024-00291-4> EDN: PAIVDY

19. Efremov AV, Tyaglik MS, Shcherbakov AI. Designing the means of suppressing the negative effects of encountering intensive atmospheric turbulence in the landing phase. *Russian Aeronautics*. 2021;64(2):204–209. <https://doi.org/10.3103/S1068799821020057> EDN: IXFREV

20. Ovcharenko VN, Poplavsky BK. Identification of nonstationary aerodynamic characteristics of an aircraft based on flight data. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021;60(6):864–874. <https://doi.org/10.1134/S1064230721060149> EDN: UBVVHW

21. Maine RE, Iliff KW. *Identification of Dynamic Systems: Theory and Formulation*. NASA RP 1138. 1985. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19850011474> (accessed: 11.09.2024).

22. Otnes RK, Enochson LD. *Applied Time Series Analysis. Basic Techniques*. Wiley, 1978. ISBN 0471242357, 9780471242352

23. Korsun ON, Om MH. The practical rules for aircraft parameters identification based on flight test data. *Meta-science in Aerospace*. 2024;1(1):53–65. <https://doi.org/10.3934/mina.2024003>

About the authors

Oleg N. Korsun, Doctor of Technical Sciences, Head of the Scientific and Educational Center, State Scientific Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), 7 Victorenko St, Moscow, 125319, Russian Federation; Professor, Department of Design and Certification of Aircraft Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2472-6853, ORCID: 0000-0003-3926-1024; e-mail: marmotto@rambler.ru

Moung Htang Om, Ph.D. in Technical Sciences, Post-doctoral Candidate, Department of Design and Certification of Aircraft Engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7770-2962; e-mail: mounhtangom50@gmail.com

Сведения об авторах

Корсун Олег Николаевич, доктор технических наук, руководитель научно-образовательного центра, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Российская Федерация, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2; профессор кафедры проектирования и сертификации авиационной техники, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 2472-6853, ORCID: 0000-0003-3926-1024; e-mail: marmotto@rambler.ru

Ом Моунг Хтанг, кандидат технических наук, докторант кафедры проектирования и сертификации авиационной техники, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0000-0002-7770-2962; e-mail: mounhtangom50@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-28-38
EDN: JWTYWJ

Научная статья / Research article

Сравнительный анализ динамического коэффициента неравномерности ветровых электростанций в различных энергосистемах

О.Ю. Сигитов

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ OlegSigitov@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 6 сентября 2024 г.
Доработана: 22 декабря 2024 г.
Принята к публикации: 13 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. В условиях интеграции ветровых электростанций в электроэнергетические системы важным условием является обеспечение надежного энергоснабжения потребителей. Изменение режимов работы ветровых электростанций (ВЭС) должно компенсироваться возможностями регулировочного диапазона традиционных электростанций на загрузку или разгрузку по активной мощности. Поэтому при увеличении установленной мощности ВЭС в энергосистемах улучшение характеристик маневренности тепловых электростанций, в том числе расширение регулировочного диапазона, является основным условием надежной работы энергосистемы. Представлены результаты исследований по расчету динамического коэффициента неравномерности для различных энергосистем с ветровыми электростанциями. Сопоставление результатов позволило установить, что изменение мощности ВЭС амплитудой до 40 % от установленной или базисной мощности ВЭС с периодом колебаний от 15 мин до 3 ч составляет основную продолжительность времени (около 90 %). На примере энергосистемы Австралии показано, что распределение ВЭС по энергосистеме оказывает положительный эффект на выравнивание графика нагрузки.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетические системы, маневренность, возобновляемые источники энергии, динамический коэффициент неравномерности

Для цитирования:

Сигитов О.Ю. Сравнительный анализ динамического коэффициента неравномерности ветровых электростанций в различных энергосистемах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 28–38. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-28-38>



Comparative Analysis of Wind Farms Dynamic Coefficient of Unevenness in Various Energy Systems

Oleg Yu. Sigitov 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ OlegSigitov@gmail.com

Article history

Received: September 24, 2024

Revised: December 22, 2024

Accepted: January 13, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. In the context of integrating wind farms into power systems, it is imperative to ensure a reliable power supply to consumers. Changes in the operating modes of wind power plants (WPPs) should be compensated for by the ability of the control range of conventional power plants to load or unload active power. Therefore, when increasing the installed capacity of WPPs in power systems, improving the manoeuvrability characteristics of thermal power plants, including the expansion of the regulation range, is the main condition for reliable operation of the power system. The results of research on calculation of dynamic non-uniformity coefficient for different power systems with wind power plants are presented. Comparison of the results made it possible to establish that changes in WPP power with an amplitude of up to 40% of the installed or baseline WPP power and a fluctuation period of 15 minutes to 3 hours constitute the main time duration (about 90%). Using the Australian power system as an example, it is shown that the distribution of WPPs across the power system has a positive effect on load schedule levelling.

Keywords: energy, electric power systems, flexibility, renewable energy sources, dynamic coefficient of unevenness

For citation:

Sigitov OYu. Comparative analysis of wind farms dynamic coefficient of unevenness in various energy systems. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):28–38. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-28-38>

Введение

Ветровые электростанции (ВЭС) в связи с нестабильными режимами работы требуют особого подхода к расчету параметров, характеризующих их влияние на режим работы электроэнергетической системы (далее — ЭЭС). В темпе протекающих в энергосистеме процессов генерация ВЭС зависит от скорости и направления ветра и тем самым вносит изменения в формирование балансов мощности, что влияет на оптимальное распределение мощности между электростанциями. В долгосрочных прогнозах генерация ВЭС зависит от климатических изменений, для которых прогнозируется увеличение количества дней с минимальной выработкой электрической энергии ВЭС [1]. В связи с этим определение режимов работы ВЭС является важной задачей для исследования их влияния на энергосистемы.

Определение закономерностей режимов работы ВЭС позволяет оценить возможности генерирующего оборудования традиционных электростанций (ТЭС, ГЭС, АЭС) работать в переменных режимах. На их основании также разрабатываются различные энергетические комплексы для надежной интеграции ВЭС в энергосистемы, например в сочетании с электролиниями установками [2]. Возможность работы генерирующего оборудования ТЭС, ГЭС, АЭС в переменных режимах определяется набором характеристик маневренности, в числе которых находится регулировочный диапазон, под которым понимается интервал допустимых нагрузок генерирующего оборудования по активной и реактивной мощности для нормальных условий его эксплуатации, при которых параметры генерирующего оборудования находятся в допустимых пределах. Этим обусловлена необходимость знать заранее амплитуду

суточных колебаний графика генерации для оценки возможности использования традиционными электростанциями существующего регулировочного диапазона. Следует отметить, что регулировочный диапазон в значительной степени отличается у различных типов электростанций. В табл. 1 приведены примеры регулировочного диапазона для некоторых электростанций [3–4]. ГЭС обладают лучшими характеристиками маневренности в сравнении с другими типами электростанций, так как имеют максимальную скорость изменения нагрузки

во всем регулировочном диапазоне активной мощности и практически неограниченный диапазон регулировочного диапазона активной мощности, который может уменьшаться в связи с особенностями водного режима [5]. Другие электростанции имеют ограничение регулировочного диапазона по нижнему пределу (технологическому или техническому минимуму). В связи с этим необходимый объем и скорость регулирования на сутки вперед для традиционных электростанций необходимо устанавливать с учетом изменения графика генерации ВЭС.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики маневренности различных энергоблоков / Flexibility of different generation units

Тип генерирующего оборудования / электростанций / Type of generation units / power plants	Скорость изменения нагрузки во всем регулировочном диапазоне активной мощности, % $P_{\text{уст}}/\text{мин}$ / Rate of load variation over the entire active power control range, % $P_{\text{nom}}/\text{min}$	Нижний предел регулировочного диапазона активной мощности в конденсационном режиме, % $P_{\text{уст}}/\text{мин}$ / Lower limit of the active power control range in condensing mode, % P_{nom}
Паросиловые установки / Steam turbine unit		
ПСУ ТЭС (газ) ¹⁾ / STU TPP (natural gas)	4	40
ПСУ ТЭС (уголь) ¹⁾ / STU TPP (coal)	4	50
ПСУ (каменный уголь) ²⁾ / STU (coal)	1,5–4	25–40
ПСУ (каменный уголь) ³⁾ / STU (coal)	3–6	25–40
ПСУ (бурый уголь) ²⁾ / STU (lig)	1–2	50–60
ПСУ (бурый уголь) ³⁾ / STU (lig)	2–6	35–50
Газотурбинные и парогазовые установки / Gas turbine and combined cycle power plant		
ПГУ (ПТ + Н ГТУ) ¹⁾ / CCPP (ST + N GT)	5	50
ПГУ (1 ПТ + 2 ГТУ) ¹⁾ / CCPP (1 ST + 2 GT)	5	25
ПГУ (1 ПТ + 3 ГТУ) ¹⁾ / CCPP (1 ST + 3 GT)	5	17
ГТУ ²⁾ / GT	8–12	40–50
ГТУ ³⁾ / GT	10–15	20–50
ПГУ ²⁾ / CCPP	2–4	40–50
ПГУ ³⁾ / CCPP	4–8	30–40
Атомные электростанции малой мощности / Low capacity nuclear power plant [6]		
АСММ на базе РИТМ-200 / Low capacity NPP based on RITM-200	6	20
Гидроэлектростанции / Hydro power plant		
ГЭС / HPP	10–30	0

¹⁾ Характеристики действующих энергоблоков согласно Постановлению Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 (ред. от 08.12.2018) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

²⁾ Характеристики действующих энергоблоков согласно [7].

³⁾ Характеристики передовых энергоблоков согласно [7].

¹⁾ Characteristics of generation units in operation in accordance with Decree of the Government of the Russian Federation No. 937 dated 08.08.2018 (as amended on 08.12.2018) "On Approval of the Rules for the Technological Functioning of Electric Power Systems and on Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation".

²⁾ Characteristics of generation units in operation in accordance with [7].

³⁾ Characteristics of advanced generation units in accordance with [7].

1. Способ определения изменения графика генерации ветровых электростанций

Быстрые изменения генерации ВЭС требуют оперативности принятия решений для обеспечения системной надежности ЭЭС. Учитывая, что одновременное снижение или увеличение мощности удаленных друг от друга ВЭС происходит независимо друг от друга (графики генерации не коррелируются), расчеты следует проводить с учетом генерирующей мощностью всех ВЭС в энергосистеме, а не отдельных станций. Тем самым колебания генерации ВЭС бу-

дут накладываться друг на друга и снижать общую неравномерность графика генерации.

Указанный эффект показан на примере режимов работы ВЭС в течение суток 30.08.2024 г. в энергосистеме Австралии¹ (рис. 1–6). Установленная мощность всех ВЭС составляет 11 409 МВт. У отдельных энергообъединений (рис. 1–5) результирующий график нагрузки может носить резкопеременный характер, особенно если рассматривать график генерации отдельных ВЭС. В то же время колебания ВЭС компенсируют друг друга, и результирующий график по всей энергосистеме Австралии выравнивается (рис. 6).

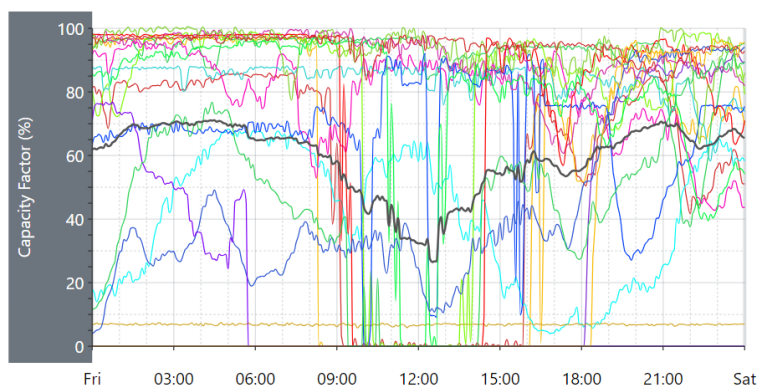


Рис. 1. ВЭС энергообъединения New South Wales, 2 765 МВт

Источники: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 1. WF in energy system “New South Wales”, 2 765 MW

Source: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

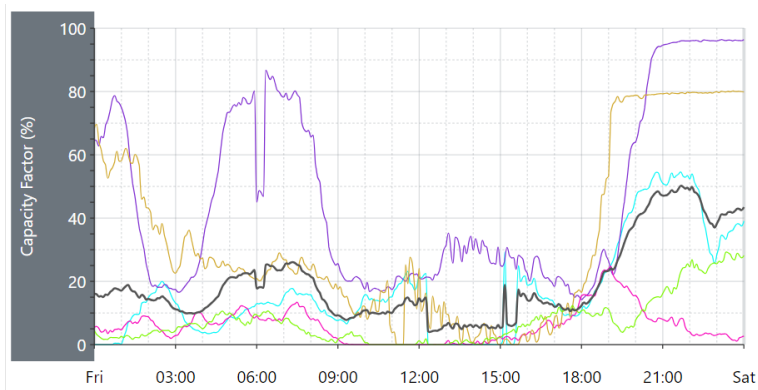


Рис. 2. ВЭС энергообъединения Queensland, 1 011 МВт

Источники: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 2. WF in energy system “Queensland”, 1 011 MW

Source: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

¹ Australian Energy Market. Energy data from the Australian Energy Market Operator. URL: <https://anero.id/energy>

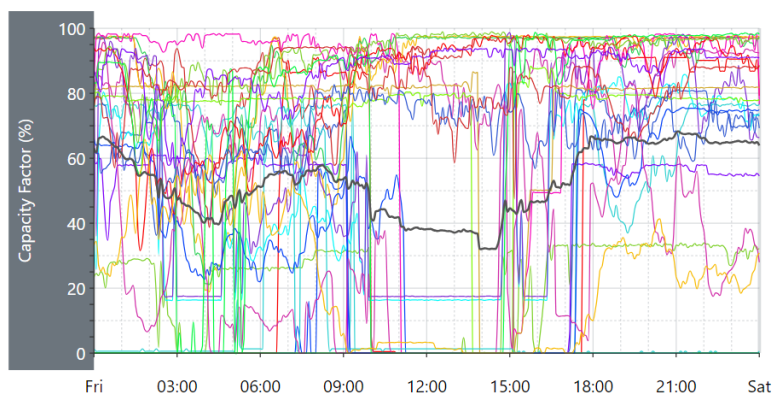


Рис. 3. ВЭС энергообъединения South Australia, 2 763 МВт

Источник: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 3. WF in energy system “South Australia”, 2 763 MW

Source: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

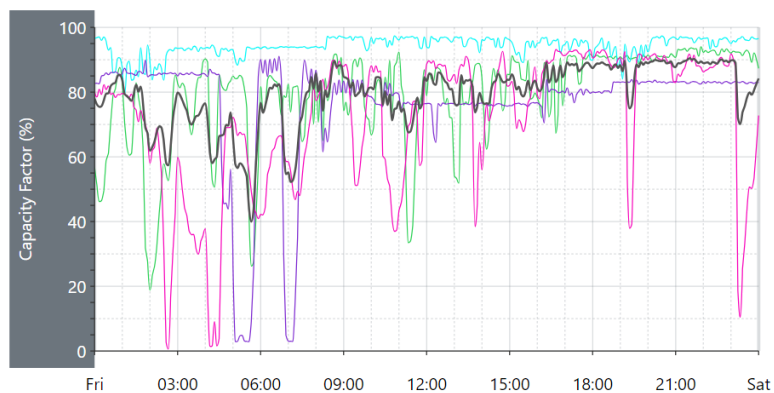


Рис. 4. ВЭС энергообъединения Tasmania, 566 МВт

Источник: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 4. WF in energy system “Tasmania”, 566 MW

Source: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

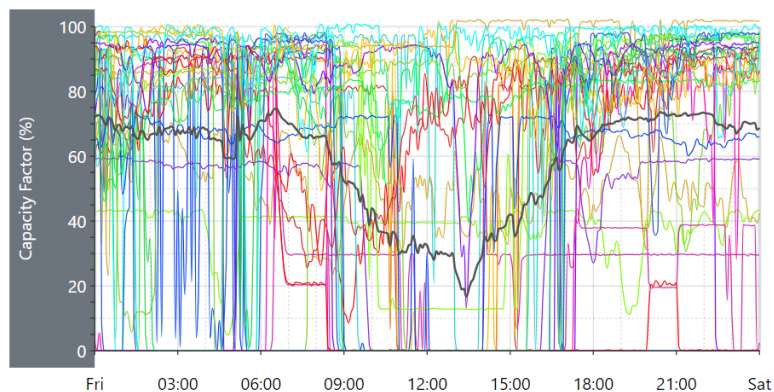


Рис. 5. ВЭС энергообъединения Victoria, 4 304 МВт

Источник: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 5. WF in energy system “Victoria”, 4 304 MW

Source: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

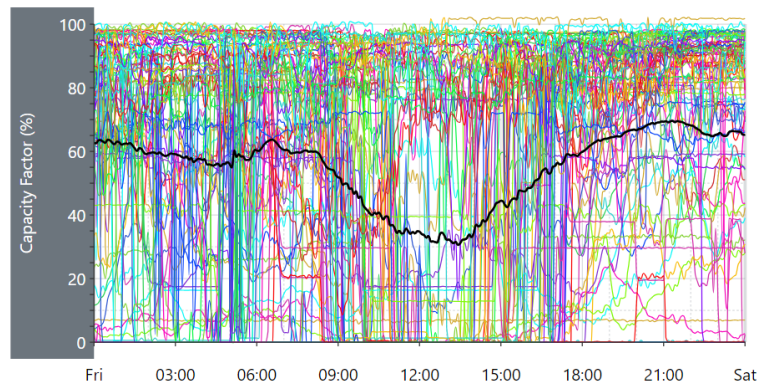


Рис. 6. Все ВЭС энергосистемы Австралии, 11 409 МВт

И с т о ч н и к: Australian Energy Market. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.05.2024)

Figure 6. All WF in energy system of Australia, 11 409 MW

S o u r c e: Australian Energy Market. Available from: <https://anero.id/energy> (accessed: 12.05.2024)

Исследования в области анализа колебаний мощности ВЭС проводятся в мире различными институтами и авторами. В основном методы базируются на статистической обработке больших массивов данных. Некоторые из них основаны не только на исследовании режимов работы ВЭС, но и их влиянии на энергосистемы [8]. Другие исследования направлены на численное определение скорости изменения мощности ВЭС, что представляет собой наиболее важную задачу для обеспечения надежности энергосистемы [9–10]. Такие работы приобретают особую важность при обосновании характеристик маневренности ПГУ, которые связаны с расчетом термонапряженного состояния и анализом циклической прочности критических элементов парового тракта при различных скоростях нагружения [11].

Изменение графика генерации ВЭС можно определить по значениям динамического коэффициента неравномерности [12]:

$$K_{\text{н дин.}i} = \frac{P_n - P_{n+1}}{P_6}, \quad (1)$$

где P_n — мощность ВЭС, соответствующая измерению n , МВт; P_{n+1} — мощность ВЭС, соответствующая следующему измерению $n+1$, МВт; P_6 — базисная мощность (принимается

равной наибольшему значению колебаний мощности ВЭС или установленной мощности ВЭС), МВт; $K_{\text{н дин.}i} < 0$ соответствует увеличению мощности ВЭС; $K_{\text{н дин.}i} > 0$ соответствует снижению мощности ВЭС. При $K_{\text{н дин.}i} = 0$ мощность ВЭС не изменяется.

Повторяемость динамического коэффициента неравномерности устанавливает отношение числа случаев со значениями, входящими в заданный интервал, к общему числу случаев:

$$t(\Delta K_{\text{н дин.}j}) = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где $t(\Delta K_{\text{н дин.}j})$ — повторяемость динамического коэффициента неравномерности ВЭС в интервалах $t(\Delta K_{\text{н дин.}j})$, о.е.; m — число значений динамического коэффициента неравномерности $K_{\text{н дин.}i}$ в рассматриваемом интервале $\Delta K_{\text{н дин.}j}$, о.е.; n — общее число значений динамического коэффициента неравномерности $K_{\text{н дин.}i}$ в течение рассматриваемого периода времени, то есть во всех интервалах $\Delta K_{\text{н дин.}j}$, о.е.; j — количество интервалов; i — количество измерений.

2. Результаты исследования энергосистем с ветровыми электростанциями

В рамках исследований проведен анализ результатов расчета динамического коэффициента неравномерности для четырех вариантов энергосистем с ветровыми электростанциями.

1. **Модель одной ВЭС** представляет собой модель ВЭС большой мощности 3,4 ГВт в Новороссийске с исходными данными на основании трехчасовых измерений средней скорости ветра в течение октября 2017–2019 гг. [13].

В соответствии с представленными результатами исследований высокий показатель повторяемости динамического коэффициента неравномерности (равен нулю примерно в 60 % времени в течение октября при коэффициенте вариации около 10 %) объясняется не стабильной выработкой ВЭС, а значительным числом безветренных часов. В сравнении с «Моделью системы ВЭС» у системы ВЭС суммарное число безветренных часов составило 46 ч, в то время как в случае одной ВЭС Новороссийск составило 436 ч.

2. **Модель системы ВЭС** представляет собой модель, которая состоит из пяти ВЭС по 680 МВт каждая в населенных пунктах Новороссийск, Маргаритово, Должанск, Ставрополь, Ейск. Модель рассчитана аналогично на основании трехчасовых измерений средней скорости ветра в течение октября 2017–2019 гг. [13].

Результаты расчетов показывают, что за период с октября 2017 и по 2019 г. трехчасовые изменения мощности амплитудой не более $0,2P_{уст.ВЭС}$ наблюдаются около 85 % времени в течение октября. Таким образом, традиционные электростанции в рассматриваемой ЭЭС должны практически каждые три часа должны быть в готовности загрузиться/разгрузиться на $0,2P_{уст.ВЭС}$, или 680 МВт.

3. **ВЭС в энергосистеме Германии 2021** включает в себя ВЭС, подключенные к энергосистеме Германии, суммарной мощностью 20 968 МВт (19 875 МВт наземные ВЭС и 1 093 МВт оффшорные ВЭС). В качестве исход-

ных данных выбраны реальные усредненные 15-минутные значения активной мощности ВЭС в течение 2021 г. [14].

В указанном исследовании расчет динамического коэффициента неравномерности проводился с разделением на $K_{н\text{дин},i} \geq 0$ и $K_{н\text{дин},i} < 0$. Результаты показали, что изменения мощности всех ВЭС на снижение и повышение активной мощности отличаются незначительно: 50,5 % повторяемости соответствует снижению мощности или отсутствию изменения мощности $K_{н\text{дин},i} \geq 0$, а 49,5 % соответствует повышению мощности $K_{н\text{дин},i} < 0$.

Основную продолжительность времени в течение года (71,75 %) блокам ТЭС необходимо загружать или разгружать в интервале $0,0 \div 0,1$, что соответствует $0 \div 118$ МВт в пересчете от базисной мощности. Таким образом, в данном интервале блоки ТЭС должны обладать маневренностью набора и снижения активной мощности со скоростью не менее 8 МВт/мин в пределах регулировочного диапазона. При максимальном изменении мощности (1179 МВт) скорость должна составлять не менее 79 МВт/мин.

4. **ВЭС в энергосистеме Германии 2020** также включает в себя ВЭС, подключенные к энергосистеме Германии, суммарной мощностью 20 206 МВт (19 138 МВт — наземные ВЭС и 1 068 МВт — оффшорные ВЭС). В качестве исходных данных выбраны реальные усредненные 15-минутные значения активной мощности ВЭС в течение 2020 г. [15].

В исследовании показано соотношение изменения мощности ВИЭ на снижение и повышение активной мощности, которое также меняется незначительно. Для всех ВЭС 50,9 % повторяемости соответствует снижению мощности или отсутствию изменения мощности ($K_{н\text{дин},i} \geq 0$), а 49,1 % соответствует повышению мощности ($K_{н\text{дин},i} < 0$). Таким образом, генераторы традиционных электростанций должны быть в равной степени готовы как к загрузке по активной мощности, так и к разгрузке.

Результаты сравнительного анализа результатов расчета динамического коэффициента неравномерности для четырех вариантов энергосистем с ветровыми электростанциями представлены в табл. 2 и на рис. 7. Второй, третий и четвертый варианты показывают высокую корреляционную зависимость, близкую к единице. Коэффициент корреляции между первым вариантом и остальными составляет около 0,2. Следовательно, ветровые электростанции большой мощности, расположенные в удаленных друг от друга узлах, демонстрируют схо-

жие закономерности в режимах работы в разных энергосистемах.

Таким образом, распределение ВЭС по энергосистеме помимо положительного эффекта в части выравнивания графика нагрузки позволяет установить закономерность изменения динамического коэффициента неравномерности: около 90 % времени амплитуда максимальное значение амплитуды колебаний мощности не превышает 40 % от установленной мощности ВЭС или базисной мощности ВЭС при периоде колебаний от 15 мин до 3 ч.

Таблица 2 / Table 2

Сравнение результатов расчета динамического коэффициента неравномерности для четырех вариантов энергосистем с ветровыми электростанциями
Comparison of the calculation results of the dynamic coefficient of unevenness for four variants of power systems with wind farms

Модели ВЭС / WF models Параметры / Parameters	Модель одной ВЭС ¹⁾ / Model of one WF ¹⁾	Модель системы ВЭС ¹⁾ / The model of the WF ¹⁾ system	ВЭС в энергосистеме Германии 2021 ²⁾ / WF in the German energy system 2021 ²⁾	ВЭС в энергосистеме Германии 2020 ³⁾ / WF in the German energy system 2020 ³⁾
Установленная мощность ВЭС, ГВт / Installed WF capacity, GW	3,4	3,4	20,968	20,206
Исследуемый период времени / The time period under study	Октябрь / October 2017–2019	2017–2019	2021	2020
Период колебаний мощности ВЭС ⁴⁾ / The period of fluctuations in WF ⁴⁾ power	3 ч/ч	3 ч/ч	15 мин/min	15 мин/min
$\Delta K_{\text{н.дин.}j}$	$t(\Delta K_{\text{н.дин.}j}), \%$			
0	60,73	6,48	0,01	0,00
0,0–0,1	15,92	64,51	71,75	64,81
0,1–0,2	8,23	18,76	19,48	23,04
0,2–0,3	2,43	7,29	5,93	7,82
0,3–0,4	3,64	2,56	1,9	2,88
0,4–0,5	3,24	0,27	0,54	0,95
0,5–0,6	2,43	0,00	0,26	0,32
0,6–0,7	0,54	0,13	0,08	0,12
0,7–0,8	0,27	0,00	0,04	0,03
0,8–0,9	1,21	0,00	0	0,02
0,9–1,0	0,94	0,00	0,01	0,01

¹⁾ Базисная мощность принята 3,4 ГВт.

²⁾ Базисная мощность принята 1179 МВт.

³⁾ Базисная мощность принята 1126 МВт.

⁴⁾ Период колебаний мощности ВЭС в моделях определен на основании имеющихся данных по измерениям скорости ветра или генерации мощности ВЭС.

¹⁾ The base power is 3.4 GW.

²⁾ The base power is 1179 MW.

³⁾ The base power is 1126 MW.

⁴⁾ The period of fluctuations in wind power in the models is determined based on available data on measurements of wind speed or generation of wind power.

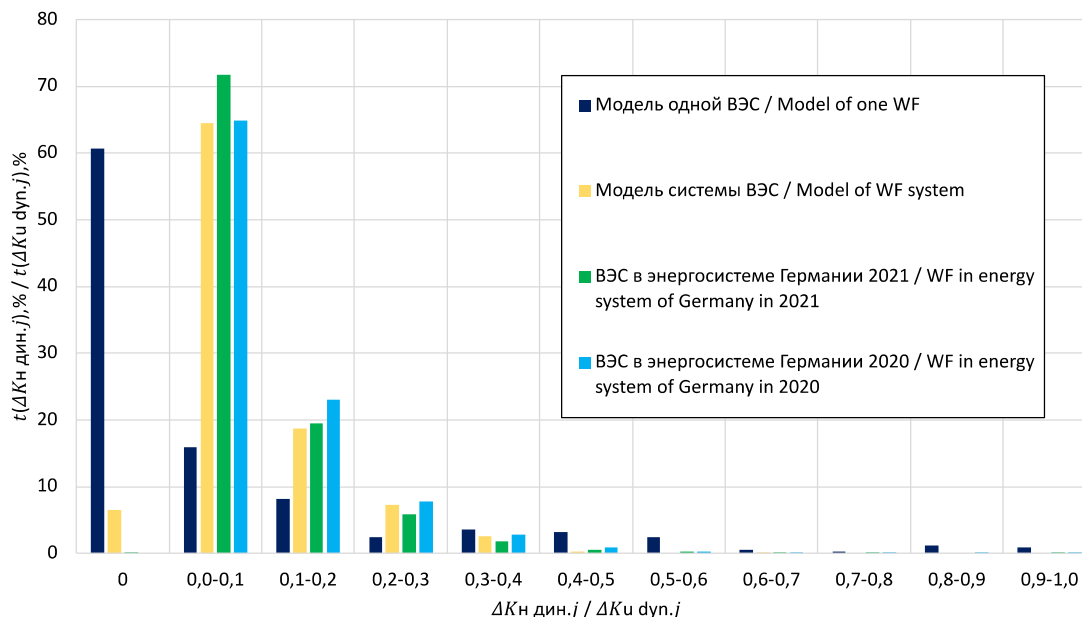


Рис. 7. Сравнение результатов расчета динамического коэффициента неравномерности для четырех вариантов энергосистем с ветровыми электростанциями
И с т о ч н и к: выполнено О.Ю. Сигитовым

Figure 7. Comparison of the calculation results of the dynamic coefficient of unevenness for four options of power systems with wind farms
S o u r c e: made by O.Yu. Sigitov

Заключение

Одной из проблем развития ветровых электростанций в электроэнергетических системах является нестабильная генерация ими мощности. Указанная проблема оказывает заметное влияние на режимы работы традиционных электростанций, в том числе на маневренные характеристики, пуски и остановки генерирующего оборудования. Исследуя закономерности изменения графиков генерации ветровых электростанций, можно оценить готовность существующих традиционных электростанций работать по изменяющемуся графику нагрузки и принять решение об ограничении установленной мощности ветровых электростанций или вводе дополнительных высокоманевренных мощностей.

В статье показаны результаты исследования энергосистем с ветровыми электростанциями в виде анализа неравномерности графика генерации ветровых электростанций. На примере использования динамического коэффициента неравномерности можно выделить харак-

терные режимы работы ветровых электростанций. Чем больше установленная мощность ветровых электростанций, тем значительнее будет их влияние на режимы энергосистемы, однако негативный эффект можно снизить при помощи распределения ВЭС на удаленном друг от друга расстоянии. Указанный эффект показан на примере режимов работы ВЭС в течение суток 30.08.2024 г. в энергосистеме Австралии — колебания ВЭС компенсируют друг друга и результирующий график по всей энергосистеме выравнивается.

Распределение ВЭС по энергосистеме помимо положительного эффекта в части выравнивания графика нагрузки позволяет установить закономерность изменения динамического коэффициента неравномерности. В рассматриваемых моделях энергосистем около 90 % времени максимальное значение амплитуды колебаний мощности не превышает 40 % от установленной мощности ВЭС или базисной мощности ВЭС при периоде колебаний от 15 мин до 3 ч.

Список литературы

1. Feng Sh., Wang W., Wang Z., Song Z., Yang Q., Wang B. Global Wind-Power Generation Capacity in the Context of Climate Change // *Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.09.018> EDN: HNLMEG
2. Nhien C., Behzadi A., Assareh E., Lee M., Sadri-zadeh S. A new approach to wind farm stabilization and peak electricity support using fuel cells: Case study in Swedish cities // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 80. P. 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.101> EDN: LTZFX Y
3. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Burtsev S.Yu., Andryushin K.A., Khurshudyan S.R. Methodology for consideration of specific features of combined-cycle plants with the optimal sharing of the thermal and the electric loads at combined heat power plants with equipment of a complex configuration // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. No. 5. P. 335–340. <https://doi.org/10.1134/S0040601515050018> EDN: VAAQGV
4. Radin Yu.A., Davydov A.V., Chugin A.V., Piskovatskov I.N. Determining the permissible load-control range of a PGU-450t power-generating unit operating in a condensing mode // *Thermal Engineering*. 2004. Vol. 51. No. 5. P. 389–394. EDN: RNGJQX
5. Георгиевский И.Д. Способы улучшения параметров маневренности традиционных электростанций в энергосистемах в условиях увеличения доли генерации на основе ВИЭ // XII Международная научно-практическая конференция. Современные тенденции и инновации в науке и производстве. Междуреченск, 2023. С. 516.1–516.8. EDN: QFEEYK
6. Petrunin V.V. Reactor units for small nuclear power plants // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021. Vol. 91. No. 3. P. 335–346. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182> EDN: VBQKKS
7. Taibi E., Nikolakakis T., Gutierrez L., Fernandez del Valle C., Kiviluoma J., Lindroos T.J., Rissanen S. Power System Flexibility for the Energy Transition. Part 1: Overview for policy makers / *International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi, 2018. 46 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11150.61768>
8. Cetinay H., Kuipers F.A., A. Guven A.N. Optimal siting and sizing of wind farms // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 101. P. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.008>
9. Ahn E., Hur J. A Practical Metric to Evaluate the Ramp Events of Wind Generating Resources to Enhance the Security of Smart Energy Systems // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article no. 2676. <https://doi.org/10.3390/en15072676> EDN: LQECLU
10. D'Amico G., Petroni F., Vergine S. Ramp Rate Limitation of Wind Power: An Overview // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article no. 5850. <https://doi.org/10.3390/en15165850> EDN: ZLNACL

11. Радин Ю.А., Конторович Т.С., Молчанов К.А. Эффективность моделирования пусков парогазовых установок из горячего состояния // *Теплоэнергетика*. 2015. № 9. С. 18. <https://doi.org/10.1134/S0040363615090076> EDN: UDEVFV
12. Сигитов О.Ю. Разработка метода рациональной расстановки ветровых электростанций в электроэнергетической системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022. 20 с.
13. Sigitov O.Y., Chemborisova N.S. Features of the operation of wind power plants in an electric power system // *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55. No. 4. P. 620–624. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01407-y> EDN: JOAIAZ
14. Сигитов О.Ю., Вивчар А.Н. Проблемы управления ветровыми и тепловыми электростанциями в электроэнергетической системе // *Электрические станции*. 2022. № 12 (1097). С. 2–9. EDN: XFLTEJ
15. Сигитов О.Ю. Особенности работы ветровых и солнечных электростанций в энергосистеме // *Электрические станции*. 2024. № 7 (1116). С. 25–32. <https://doi.org/10.71841/ep.elst.2024.1116.7.04> EDN: IALSPK

References

1. Feng Sh, Wang W, Wang Z, Song Z, Yang Q, Wang B. Global Wind-Power Generation Capacity in the Context of Climate Change. *Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.09.018> EDN: HNLMEG
2. Nhien C, Behzadi A, Assareh E, Lee M, Sadri-zadeh S. A new approach to wind farm stabilization and peak electricity support using fuel cells: Case study in Swedish cities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;80:22–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.101> EDN: LTZFX Y
3. Arakelyan EK, Andryushin AV, Burtsev SYu, Andryushin KA, Khurshudyan SR. Methodology for consideration of specific features of combined-cycle plants with the optimal sharing of the thermal and the electric loads at combined heat power plants with equipment of a complex configuration. *Thermal Engineering*. 2015;62(5): 335–340. <https://doi.org/10.1134/S0040601515050018> EDN: VAAQGV
4. Radin YuA, Davydov AV, Chugin AV, Piskovatskov IN. Determining the permissible load-control range of a PGU-450t power-generating unit operating in a condensing mode. *Thermal Engineering*. 2004;51(5):389–394. EDN: RNGJQX
5. Georgievsky ID. Ways to improve the maneuverability parameters of traditional power plants in power systems in conditions of an increase in the share of renewable energy generation. *XII International Scientific and Practical Conference. Current Trends and Innovations in Science and Production*. Mezhdurechensk; 2023. P. 516.1–516.8. (In Russ.) EDN: QFEEYK

6. Petrunin VV. Reactor units for small nuclear power plants. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021; 91(3):335–346. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182> EDN: VBQKKS
7. Taibi E, Nikolakakis T, Gutierrez L, Fernandez del Valle C, Kiviluoma J, Lindroos TJ, Rissanen S. *Power System Flexibility for the Energy Transition*. Part 1: Overview for policy makers, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi; 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11150.61768>
8. Cetinay H, Kuipers FA, Guven AN. Optimal siting and sizing of wind farms. *Renewable Energy*. 2017;101: 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.008>
9. Ahn E, Hur J. A Practical Metric to Evaluate the Ramp Events of Wind Generating Resources to Enhance the Security of Smart Energy Systems. *Energies*. 2022;15(7): 2676. <https://doi.org/10.3390/en15072676> EDN: LQECLU
10. D’Amico G, Petroni F, Vergine S. Ramp Rate Limitation of Wind Power: An Overview. *Energies*. 2022; 15:5850. <https://doi.org/10.3390/en15165850> EDN: ZLNACL
11. Radin YA, Kontorovich TS, Molchanov KA. The effectiveness of combined-cycle power plants hot startups simulating. *Thermal Engineering*. 2015;62(9):630–635. <https://doi.org/10.1134/S0040601515090074>
12. Sigitov OYu. *Development of a method for the rational arrangement of wind power plants in the electric power system* (abstract of the dissertation). Moscow; 2022. (In Russ.)
13. Sigitov O, Chemborisova N. Operation features of wind power plants as part of an electric power system. *Power Technology and Engineering*. 2021;55(4):620–624. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01407-y> EDN: JOAIAZ
14. Vivchar A, Sigitov OYu. Wind farms and thermal power plants operation problems in electric power system. *Electric stations*. 2022;12(1097):2–9. (In Russ.) EDN: XFLTEJ
15. Sigitov OYu. Wind farms and solar photovoltaic power plants operation features in energy power system. *Electric stations*. 2022;7(1116):25–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.71841/ep.elst.2024.1116.7.04> EDN: IALSPK

Сведения об авторе

Сигитов Олег Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0007-8541-4542, eLIBRARY SPIN-код: 9915-2001; e-mail: OlegSigitov@gmail.com

Bio note

Oleg Yu. Sigitov, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9915-2001, ORCID: 0009-0007-8541-4542; e-mail: OlegSigitov@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51

EDN: KDZPAU

Research article / Научная статья

A Systematic Approach to Ontology Construction for Automating the Scheduling of a Multilevel University

Aleksey F. Rogachev^a✉, Dmitry S. Zakharov^b

^a Volgograd State Technical University, *Volgograd, Russian Federation*

^b Sebyakovsky branch of Volgograd State Technical University, *Mikhailovka, Russian Federation*

✉ rafr@mail.ru

Article history

Received: November 6, 2024

Revised: December 23, 2024

Accepted: January 10, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The construction of a university class schedule is one of the NP-complete problems. In cases of significant amounts of input data, typical for a multilevel university, and a set of numerous constraints, the search for an acceptable solution may take a long time or may not be optimal. The paper presents the peculiarities of a multilevel university and considers a computerized approach to the construction of an ontological model for the automation of academic scheduling, used to optimize the process of its compilation. The paper utilizes methods of semantic description of the subject area, including computer support for ontological model building. On the basis of the given analysis of the main problems the ontological approach to the formation of data structure for the tasks of training schedules compilation is substantiated. The proposed approach is realized taking into account the conditions of multilevel higher education institution. The ontological model of automated scheduling is developed. The method of solving the problem of scheduling of a multilevel university with the application of genetic algorithm (GA) using penalty functions to take into account the limitations of the mathematical model is presented. The computer program developed on the basis of the constructed class diagram provides the construction of the schedule of academic classes of a multilevel university, effective according to the integral quality criterion.

Keywords: system analysis, training schedule, ontology model, computer support, genetic algorithm, quality criterion, constraints

Authors' contribution:

Rogachev A.F. — research concept and design, data analysis, text writing; *Zakharov D.S.* — collection of materials, creation and processing of a database, development of a computer program; data analysis, writing a text.

Acknowledgements

The authors would like to thank Svetlana E. Karpushova, PhD in Economics, Associate Professor, Director of the Sebyakovsky Branch of the Volgograd State Technical University, for her assistance in collecting empirical materials used in the preparation of the article.

For citation:

Rogachev A.F., Zakharov D.S. A systematic approach to ontology construction for automating the scheduling of a multilevel university. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):39–51. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51>

© Rogachev A.F., Zakharov D.S., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Системный подход к построению онтологии для автоматизации составления расписания многоуровневого вуза

А.Ф. Рогачев^a✉, Д.С. Захаров^b

^a Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация

^b Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, Михайловка, Российская Федерация

✉ rafr@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 6 ноября 2024 г.

Доработана: 23 декабря 2024 г.

Принята к публикации: 10 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Построение расписания учебных занятий вуза — одна из трудоемких задач NP-сложности. В случаях значительных объемов входных данных, характерных для многоуровневого вуза, и совокупности многочисленных ограничений, поиск приемлемого решения может занять продолжительное время или оказаться неоптимальным. В исследовании приведены особенности многоуровневого вуза и рассмотрен компьютеризованный подход к построению онтологической модели для автоматизации составления учебного расписания, применяемой для оптимизации процесса его составления. Использованы методы семантического описания предметной области, включая компьютерную поддержку построения онтологических моделей. На основе приведенного анализа основных проблем обоснован онтологический подход к формированию структуры данных для задач составления учебных расписаний. Предложенный подход реализован с учетом условий многоуровневого вуза. Разработана онтологическая модель автоматизированного составления расписаний. Приведен метод решения задачи построения расписаний многоуровневого вуза с применением генетического алгоритма (ГА), использующего штрафные функции для учета ограничений математической модели. Разработанная на основе построенной диаграммы классов компьютерная программа обеспечивает построение расписания учебных занятий многоуровневого вуза, эффективного по интегральному критерию качества.

Ключевые слова: системный анализ, расписание учебных занятий, онтологическая модель, компьютерная поддержка, генетический алгоритм, критерий качества, ограничения

Вклад авторов

Рогачев А.Ф. — концепция и дизайн исследования, анализ данных, написание текста; *Захаров Д.С.* — сбор материалов, создание и обработка базы данных, разработка программы для ЭВМ, анализ данных, написание текста.

Благодарности

Авторы благодарят директора Себряковского филиала Волгоградского государственного технического университета, кандидата экономических наук, доцента Светлану Евгеньевну Карпушову за содействие в сборе эмпирических материалов, использованных при подготовке статьи.

Для цитирования:

Rogachev A.F., Zakharov D.S. A systematic approach to ontology construction for automating the scheduling of a multilevel university // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 39–51. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51>

Introduction

Methods and approaches of systems analysis form the basis of research methodology in various branches of the economy and scientific and technological development of society, ensuring the choice of the most universal methods, including the formulation and solution of optimization problems. The ontological model, as one of the tools for implementing the systems approach, is a structure of entities (concepts, notions, types of objects), their properties and rules for establishing relationships between them.

In its most general form, a schedule is a tabular form of a graph containing instructions on the time, place, and sequence of execution of the required procedures necessary to determine the moment in time at which the management entities must be in certain positions. Schedules of many transport, production, and educational processes are organized with a certain frequency of repetitions in various time intervals.

Scheduling theory, which studies the methods of their compilation and optimization, is one of the sections of discrete mathematics and operations research. The scientific direction of scheduling theory originates from the work of Henry Gantt (Gantt H.L.) [1]. At the same time, the compilation and optimization of the schedule of classes of universities, including those combining several levels of education (multi-level), refers to labor-intensive multi-criteria problems of NP-complexity.

As a traditional method for solving the problem of optimizing educational schedules, genetic algorithms (GA) are used, which became popular in the early 1970s thanks to the monograph by J.H. Holland “Adaptation in Natural and Artificial Systems” [2].

According to the definition of E. Virsanski, “Genetic algorithms are a family of search algorithms, the ideas of which are suggested by the principles of evolution in nature. By simulating the processes of natural selection and reproduction, genetic algorithms can find high-quality solutions to problems including search, optimization, and learning” [3].

The main advantages of GA are the ability to achieve a global optimum when solving complex multi-optimal problems, applicability to optimization algorithms without calculating the gradients of the objective function, and the ability to distribute processing and parallelize the calculations of the objective function (OF).

At the same time, in [4–6] it is noted that the effectiveness of genetic algorithms significantly depends on the structure and method of coding the optimized data sets, the justification of which can be provided by methods of ontological modeling, including classes, connections, and rules for the relationship of objects.

1. Literature Review

Ontology is a way of formalizing a subject area of knowledge using a conceptual scheme that includes a data structure containing classes of objects, their connections, and rules (relations) adopted in this area” [7–13]. According to E.M. Beniaminov, “Ontologies are specifications in a formal language that record the agreements of a group of specialists on what is called what in their area and what properties it satisfies. Ontologies are usually built on a modular principle and should also be easy to understand for professionals and interpreted by systems when used” [14]. The publications of E.R. Gafarov, A.A. Lazarev, and others [15; 16] with minimax and additive criteria are devoted to the study of fundamental and applied problems of scheduling theory. The article [17] is devoted to the issues of applying scheduling theory directly to organizing the educational process in educational institutions. In [18–20], the rationale for the effectiveness of using the ontological approach to implementing situational management in some subject areas is presented.

At the same time, the issues of using the ontological approach to solve problems of optimizing the preparation of educational schedules for a specific multi-level university combining subsystems of higher and secondary vocational education require further resolution [21; 22].

In the most general form, the ontology can be written as [23]:

$$O = \langle K, R, F \rangle, \quad (1)$$

where K is a set of domain concepts; R is a set of relationships between concepts; F is a set of interpretive functions.

The constraints on the components of the ontology are the finiteness and non-emptiness of the set K , while R and F in special cases can also be empty.

2. Research Methods

The construction of an ontological model of the academic schedule of a multi-level university was based on a systems approach that takes into account the main classes of the subject area under consideration.

This study proposes an automated approach to constructing an ontological model of data used to solve the problems of compiling educational institution schedules, taking into account the structure of a multi-level university.

The ontology of the subject area was built on the basis of concepts presented in the database [24].

For automated compilation of the ontology, specialized software was used that allows you to build ontologies using the OWL language. The

program provides the ability to add objects, build a class hierarchy and assign roles between individuals.

The UML diagram was developed based on the constructed ontology, it describes the structure of the future system, demonstrates its classes, attributes, methods and dependencies between structural blocks.

3. Results and Discussion

It is necessary to justify the software platform for the automated construction of an ontological model, as well as identify the main problems that complicate the preparation of the curriculum of a multi-level university and possible directions for solving them.

3.1. Justification of a Software Platform for Automated Construction of an Ontological Model

In order to substantiate the software platform used for automated construction of the ontological model, an analysis of known proprietary software tools implementing various stages of its construction was conducted. The results of the analysis are presented in Table 1.

Table 1

Characteristics of software tools for automated ontology model building

Program	Characteristics	URL
1. Protégé	- Free and powerful ontology development tool, supports OWL, RDF - Suitable for designing complex technical and economic models	https://protege.stanford.edu
2. WebProtégé	A web-based version of Protégé that allows you to work with ontologies remotely and collaboratively	https://webprotege.stanford.edu
3. TopBraid Composer	A commercial tool for working with ontologies Provides integration with various data sources and supports SPARQL	https://www.topquadrant.com/products/topbraid-composer/
4. OntoUML	A plugin for modeling ontologies based on the OntoUML language Supports integration with other tools	https://ontouml.org
5. RDF4J	- A framework for working with RDF data and building ontologies - Supports SPARQL queries and database integration	https://rdf4j.org
6. Fluent Editor	- Ontology creation software with a simplified user interface - Suitable for simple projects	http://www.fluenteditor.com
7. Neo4j	- Ontology creation software with a simplified user interface - Suitable for simple projects	https://neo4j.com
8. OWLGrEd	- Visual ontology editor for working with OWL ontologies - Easy to use	http://owlgred.lumii.lv
9. GraphDB	A graph database optimized to handle ontologies and semantic data	https://graphdb.ontotext.com

Source: made by A.F. Rogachev

Based on the set of functional capabilities, the Protégé software tool version 5.6.4 was chosen as a platform for developing the ontological model. This software tool supports the OWL and RDF modeling languages and provides integration with various data sources.

3.2. Analysis of the Main Problems of Drawing up the Curriculum of a Multi-Level University

The University schedule is mostly organized in a periodic manner, with repetition every week or two. Such an organization allows to reduce planning costs.

In the process of drawing up schedules, it is necessary to take into account many restrictions and requirements, such as the number of students in a group, the number of teachers, the size of classrooms, the availability of special equipment, legal regulations, etc. These restrictions can be divided by the degree of severity.

Strict restrictions:

- students may only be accommodated in a free classroom;
- no teacher or student group may have more than one class at a time;
- the classroom must have the required number of seats;
- the classroom must be equipped with specialized equipment;
- the student workload must be uniform.

Soft restrictions:

- teachers' preferred class time;
- teachers' preferred classroom;
- time and space restrictions for classes for student groups or teachers (for example, if the university has remote buildings).

The compilation of a university schedule usually begins with the distribution of the teaching load of teachers based on approved curricula indicating the discipline, groups, number of people in a group and the number of classroom academic hours allocated for teaching the disciplines.

The teaching load is compiled based on the regulations and approved procedures of the authorities (Sanitary Regulations and Norms, Federal Education and Science Supervision Service, Russian

Federal State Agency for Health and Consumer Rights, Ministry of Education and Science). Some academic disciplines can be combined for several academic groups, for example, for general lectures in lecture halls, or, conversely, divided into sub-groups, for example, for computer classes and laboratories in the event of an insufficient number of workstations. The structure of the automated construction of the academic schedule can be presented in the form of an IDEF0 diagram, shown in Figure 1.

The schedule of classes is formed on the basis of the approved terms of the academic semester, and the number of academic weeks is also calculated.

A class at a university, according to the order of the Ministry of Education and Science dated April 5, 2017 No. 301, is 2 academic hours (90 minutes) long. Each discipline of the curriculum has its own number of classroom academic hours. In order to find out how many classes need to be held in a particular semester, it is necessary to divide the total number of hours by 2, and then by the number of weeks specified in the academic schedule.

Each educational institution has at its disposal a classroom fund, often located in separate buildings. Classrooms, like classes, have a specific purpose (laboratories, practical classes, gyms, lecture halls, etc.), a limited number of seats. Specialized classrooms are assigned to faculties and departments.

Thus, we get 3 global data tuples: teachers, disciplines and classrooms. In addition, it is necessary to implement the fourth group of data — these are teachers' preferences. The set of teachers' preferences will contain wishes regarding the time and date of classes. This is due to the need to involve third-party teachers in the educational process, including production workers, whose employment depends on their main workplace.

The listed data arrays must be distributed according to the schedule grid. There are quite a few manual and automated ways to perform this task. The disadvantages of manual distribution of classes are high labor intensity and complexity of coordination within multi-level universities, since it is necessary to establish communication between

different faculties and departments. For example, there are disciplines whose teachers are involved in several faculties, mainly general education (mathematics, computer science, and similar).

With this approach, the following problems may arise, reducing the quality of the compiled schedule:

- simultaneous assignment of classrooms;
- the presence of “gaps” for students and teachers;
- local excess of the workload of teachers and students above standard values;
- the preferences of teachers and “soft” restrictions for students are not taken into account.

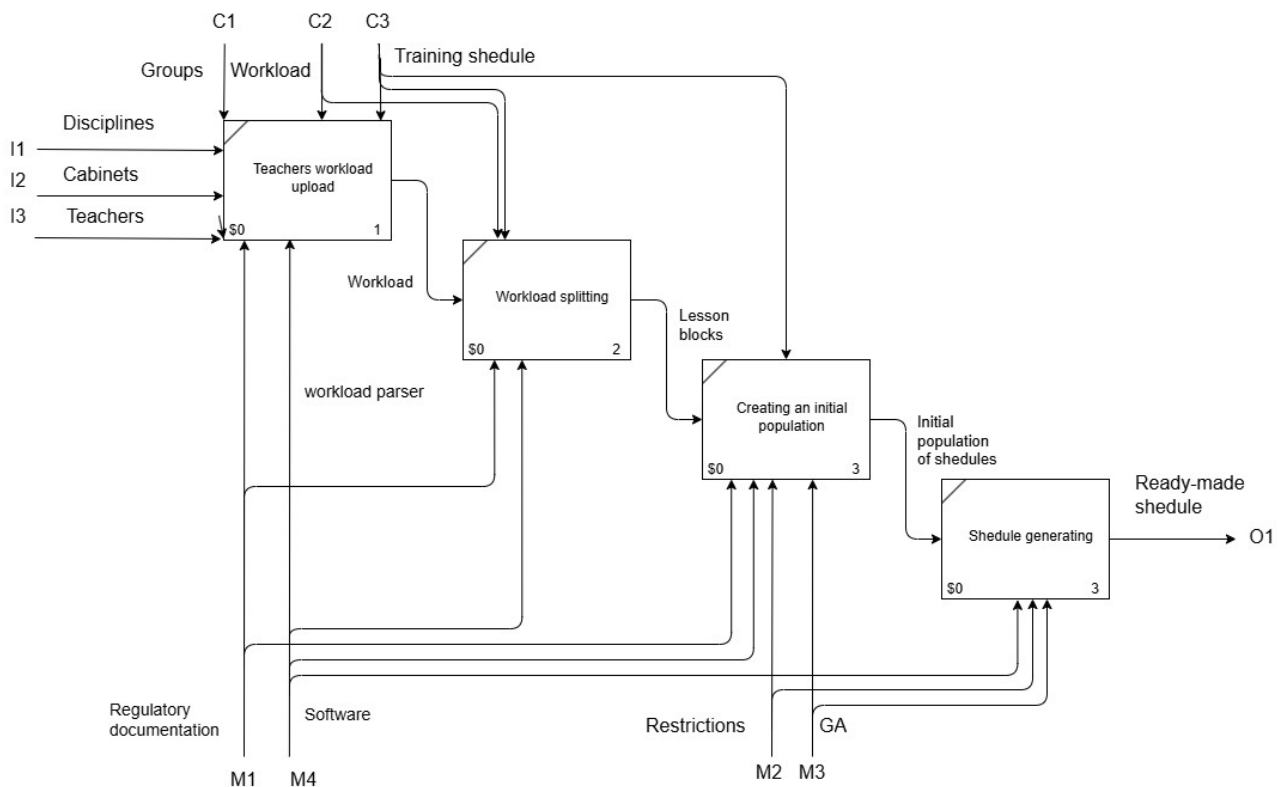


Figure 1. IDEF0-diagrams of the scheduling procedure

Source: made by D.S. Zakharov

There may be situations when the problem of a lack of free classrooms arises at the last stage of creating a schedule. In this case, the specialist must practically create a new schedule with a different distribution of teachers on the schedule grid, which greatly increases the amount of work, taking into account the preferences of teachers, which can change depending on their workload at their main place of work.

Another problem with distributing disciplines on the schedule grid is the irregular distribution of hours in the curriculum, when the classroom hours of a discipline may not be multiple of the number of weeks in a semester. In this case, disciplines must

be taught unevenly relative to the weekly schedule. In such cases, the university needs to introduce two- or three-week schedule, or set a limit on the number of weeks allocated to a small part of the discipline.

A diagram of the consistency of classes within the future system was compiled. To construct the diagram, the following were studied:

- the main limitations in drawing up schedules;
- the structure of the schedule grid of academic disciplines;
- the features of disciplines that require additional conditions, equipment, etc.;
- the influence of the size of student groups on the educational process;

- the possibility of taking into account the wishes of teachers, mainly working in several educational institutions;
- legislative and legal acts regulating the process of drawing up university schedules.

4.3. Construction of an Ontological Model

Particular cases of constructing ontologies (1) are the following.

For the case when $R = F = 0$. Then the ontology O degenerates into a regular dictionary:

$$V_c = \langle K, \{\}, \{\} \rangle. \quad (2)$$

If only $R = 0$, then each concept of the ontology can be associated with some function f from the set F .

$$K = X_1 \cup X_2, \quad (3)$$

where X_1 and X_2 — sets of correspondingly interpreted and interpreting terms.

Taking into account the problems revealed by the above analysis, the ontological model oriented towards constructing the academic schedule of the university in question will include the following concepts:

- Groups;
- Classrooms;
- Curricula;
- Teachers;
- Academic schedule;
- Workload;
- Schedule grid.

Automation of the scheduling process includes the following steps:

- Based on the curricula and the list of groups, the academic load and academic schedule are built;
- A schedule grid is formed for student groups;
- Subjects with teachers are randomly distributed across the schedule grid (without intersections);
- Suitable rooms are assigned.

The data structure table and the class interaction diagram within the future system are compiled using the given ontological model. This version of the diagram is intuitively understandable for subsequent creation of a schedule based on the genetic algorithm. Table 2 contains data for generating the zero generation of the genetic algorithm, including the names and types of data, their size, set “flags” and keys.

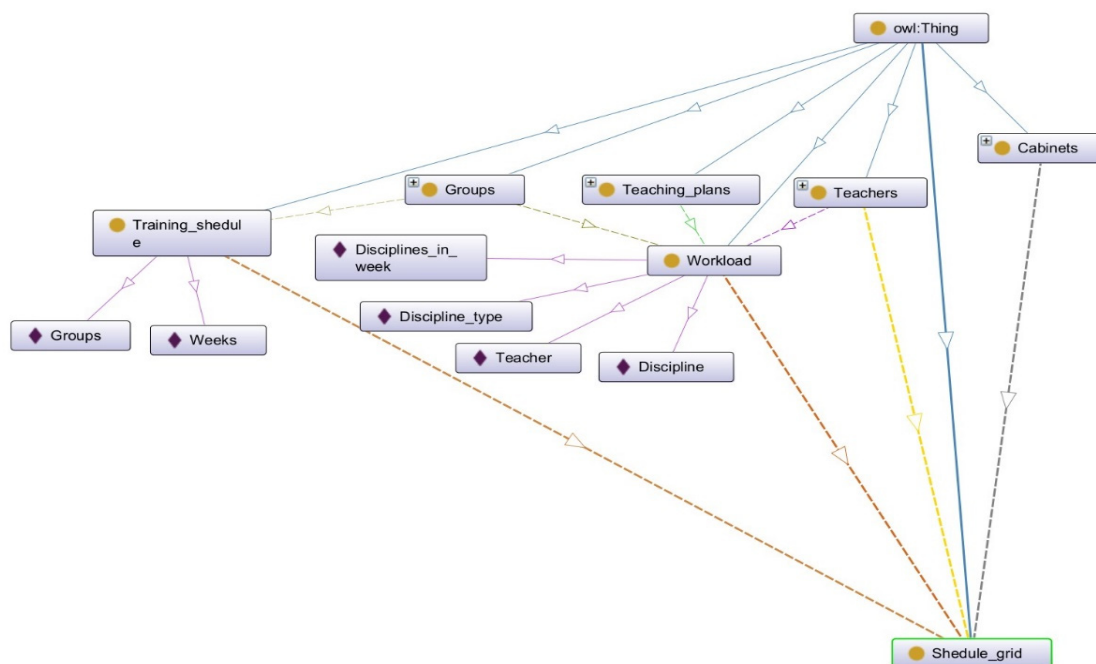


Figure 2. The structure of the formed ontological model
Source: made by D.S. Zakharov

Table 2

Data structure of the automated scheduling system

Class	Flag	Type Name	Size	Flag
1. Calendar	id	int	11	ai
	groups	varchar	255	
	semestr1	int	11	
	semestr2	int	11	
2. Breakdown	id	smallint	4	ai
	discipline_id	smallint	3	
	igroup	char	20	
	hours_lectures	tinyint	3	
	hours_prak	tinyint	3	
	hours_lab	tinyint	3	
	teacher	char	20	
3. Restricts	bond	tinyint	2	
	id	int	11	ai
	object	varchar	255	
	type	varchar	10	
4. Cabinets	data	varchar	10	
	id	int	11	ai
	build	varchar	20	
	number	varchar	20	
5. Cabinet_type	types	varchar	255	
	id	int	11	ai
6. Un_cabinets	type_name	varchar	255	
	id	int	11	ai
	name	varchar	255	
	cab_id_lek	varchar	255	
	cab_id_lab	varchar	255	
7. Curricula	cab_id_prak	varchar	255	
	id	int	11	ai
	name	varchar	255	
	semester	varchar	255	
	groups	varchar	255	
	type	varchar	255	
	kafedra	varchar	255	
	teacher	varchar	255	
	hours_lek	varchar	255	
	hours_prak	varchar	255	
	hours_lab	varchar	255	
	kafedra	varchar	255	
	teacher	varchar	255	
	hours_lek	varchar	255	
	hours_prak	varchar	255	
	hours_lab	varchar	255	

Source: made by D.S. Zakharov

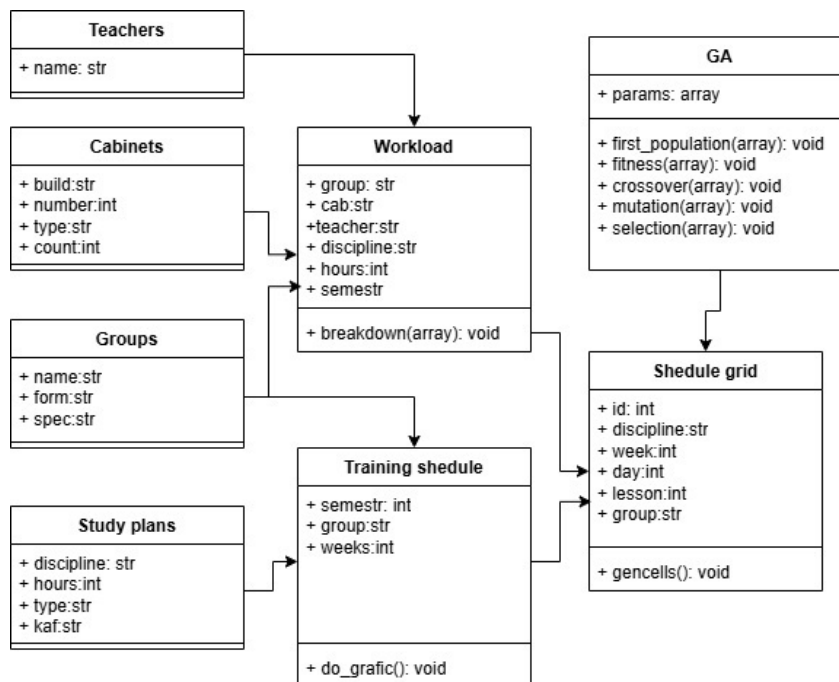


Figure 3. UML-diagram of classes of the developed software tool
Source: made by D.S. Zakharov

The ontology, including the main classes and constraints of the considered problem of automated scheduling, and the developed data structure of the system allow us to construct the class diagram shown in Figure 3.

The class diagram, constructed on the basis of the ontology, was used to develop a software tool created to optimize the scheduling of university classes. MySQL DBMS is used to store the initial information. The described approach to designing the ontology of the subject area, the DB and the program for automated construction and optimization of the schedule was tested at the Sebryakovsky branch of the Volgograd State Technical University.

Approaches based on the genetic algorithm were used, to develop the software tool modified taking into account the specifics of the problem being solved. This algorithm allows us to solve optimization problems and find the optimal solution to scheduling theory problems.

The iterative approach of the genetic algorithm using pre-justified hyperparameters, the developed CF (fitness function in GA) of the popu-

lation and the process stopping condition, uses the initial population of the structure generated randomly, and allows finding the optimized solution with sufficient accuracy.

However, the numerical experiments conducted on the basis of the described approach to solving the problem of optimizing the educational schedule revealed the following shortcomings:

- high costs of RAM and CPU loading time of the computer;
- reduction of its efficiency at the stage of completion of the optimization algorithm;
- achieving a global optimum is not always feasible, since classical variants of GA implementation allow iteratively achieving an optimum (global or one of the local ones),

Elimination of the identified shortcomings required modification of the classical GA based on a system analysis of the possibility of adjusting hyperparameters, forming the initial population and genetic operators — selection, crossing and mutation. The modified algorithm of the GA for the task of creating schedules for a multi-level university is shown in Figure 4.

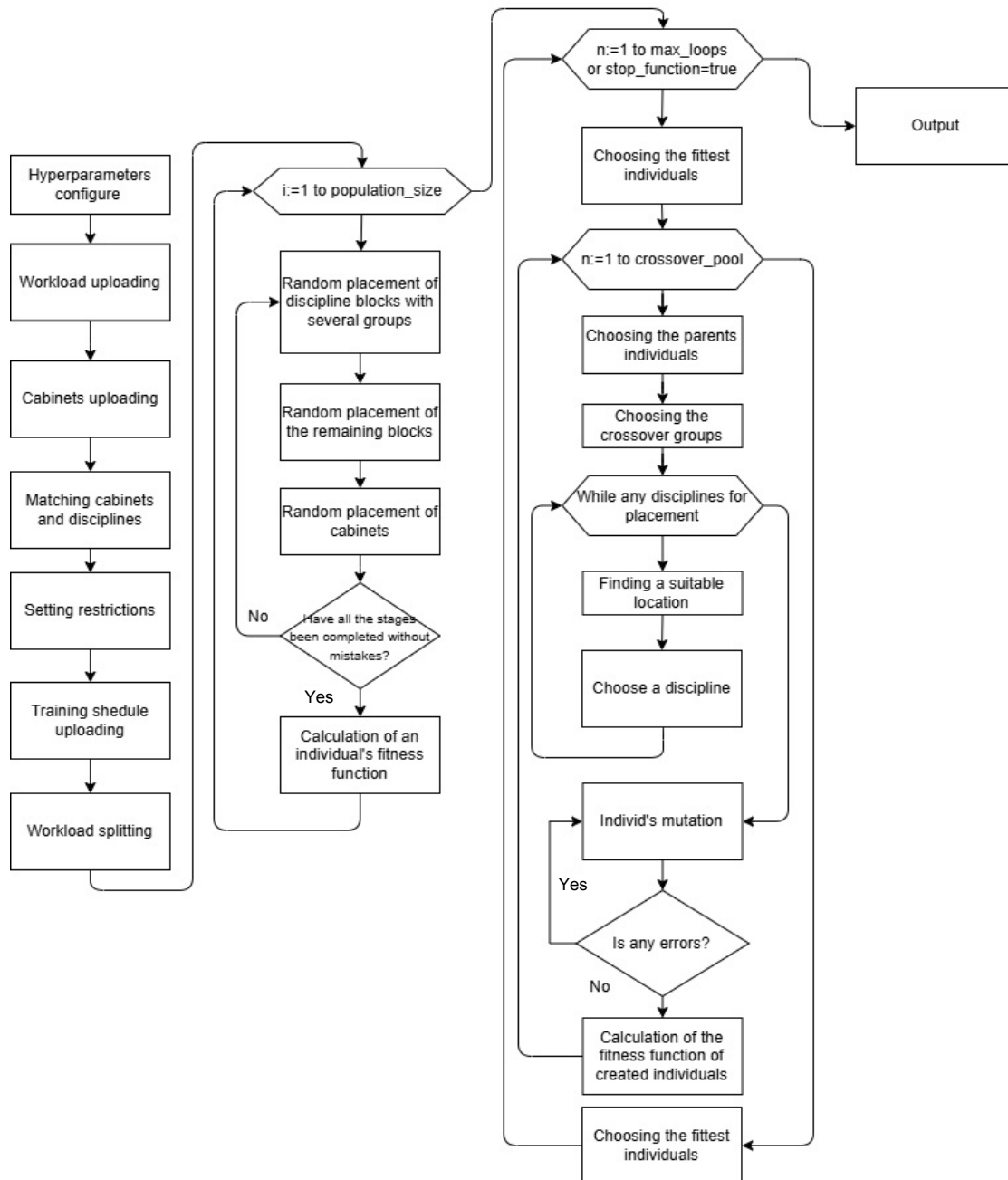


Figure 4. A modified GA algorithm for scheduling problems of a multilevel university
 Source: made by D.S. Zakharov

Thus, the use of the developed ontology for the automation of the construction of optimized educational schedules allows eliminating the shortcomings of the classical GA, reducing the time of work of educational methodologists in drawing up optimized versions of schedules, while it becomes possible to reduce the number of limitations of the mathematical model due to the flex-

ible configuration of parameters and the mentioned modifications.

Conclusion

Based on the application of a systems approach to the automated compilation of a schedule of classes for a multi-level university, the main classes and limitations that must be taken into account

when constructing and optimizing schedules of classes are identified.

It is shown that the schedule of classes and metrics for assessing their quality should be considered as complex organizational and technical systems characterized by multi-factor integral criteria due to the specifics of educational systems of a multi-level university, the subsystems of which are partially intersecting components of higher and secondary education.

The developed ontology allows one to construct a UML class diagram that implements the compilation and optimization of a schedule of classes using the example of specific conditions of a multi-level university. The operating algorithm and software tool developed on the basis of the constructed class diagram and using MySQL DBMS for storing the initial information ensure the construction of an effective schedule of classes for a multi-level university according to the integral criterion using penalty functions.

References

1. *Gantt chart software for project management*. Available from: <https://www.atlassian.com/software/jira/features/gantt-chart-software> (accessed: 14.10.2024).
2. Holland JH. *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. Available from: <https://archive.org/details/adaptationinnatu0000holl/page/n7/mode/2up> (accessed: 14.10.2024).
3. Virsanski E. *Genetic algorithms in Python*. Moscow: DMK Press, 2020. Available from: <https://e.lanbook.com/book/179496> (accessed: 12.09.2024).
4. Gladkov LA, Kureichik VV, Kureichik VM. *Genetic algorithms*. Moscow: Fiziko-matematicheskaya literatura Publ.; 2010. (In Russ.) ISBN 978-5-9221-0510-1
5. Gulivindala AK, Raju Bahubalendruni MVA, Chandrasekar R, Ahmed E, Abidi MH, Al-Ahmari A. Automated Disassembly Sequence Prediction for Industry 4.0 Using Enhanced Genetic Algorithm. *Computers, Materials & Continua*. 2021;69(2):2531–2548. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018014> EDN: MKARYC
6. Shaaban AM, Schmittner C, Gruber T, Mohamed AB, Quirchmayr G, Schikuta E. Ontology-Based Security Requirements Framework for Current and Future Vehicles. In: *Data Science and Big Data Analytics in Smart Environments*. 2021. <https://doi.org/10.1201/9780367814397-11>
7. Bolbakov RG, Mordvinov VA, Tkachenko DI. Meta-ontology in designing ontologies designing information management systems. *Socio-humanitarian problems of education and professional self-realization: Collection of materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with international participation*. Part 1. Moscow, 2021. P. 252–255. EDN: UHCYU
8. Lapshin VA. *Ontologies in computer systems*. Moscow: Nauch. Mir Publ.; 2010. (In Russ.) ISBN 978-5-91522-193-1 EDN: QMVAGJ
9. Vinogray EG. *Fundamentals of the general theory of systems*. Kemerovo: Kemerovo Institute of Technology of Food Industry (University); 1993. (In Russ.) ISBN 5-230-18654-2 EDN: BIAPBH
10. Deliya VP. *Innovative thinking in the 21st century*. Balashikha: De-Po Publ.; 2011. (In Russ.) ISBN 978-5-904147-12-9 EDN: QWYGPB
11. Olha T, Kostiantyn T, Oleksandr T. Designing Intelligent Multi-agent Ontology-Based Training Systems: The Case of State University of Infrastructure and Technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 463:181–192. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_16 EDN: CDOOXL
12. Bubareva OA, Popov FA. The use of a genetic algorithm in the context of solving the problem of finding the semantic proximity of elements of heterogeneous ontologies. *Polzunovskiy vestnik*. 2013;(2):29–32. (In Russ.) EDN: RBPXNF
13. Alekseev AP, Alekseeva IYu. Information warfare in the information society. *Questions of philosophy*. 2016; (11):5–14. (In Russ.) EDN: WZTMBZ
14. Beniaminov EM. *Some problems of widespread implementation of ontologies in IT and directions of their solution*. Available from: <http://beniaminov.rsuh.ru/BeniaminovOntoNew.pdf> (accessed: 14.10.2024).
15. Lazarev AA, Musatova EG, Gafarov ER, Kvartskheliya AG. *Theory of schedules. Tasks of railway planning*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2012. (In Russ.) ISBN: 978-5-91450-102-7 EDN TOAILR
16. Lazarev A.A. Gafarov E.R. *Theory of schedules tasks and algorithms*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2011.
17. Golyakov SM, Shilova AYU, Shilov YuM. Application of the theory of schedules for the organisation of educational process in general educational institutions. *Science and education: preserving the past, creating the future: a collection of articles of XXV International scientific and practical conference: in 2 parts, Penza, 10 December 2019. Part 1*. Penza: Science and Enlightenment Publ.; 2019. p. 42–44. (In Russ.) EDN: BLAXFV
18. Smirnov SV. Ontological modeling in situational management. *Ontology of designing*. 2012;2(4):16–24. (In Russ.) EDN: OYRLIF
19. Rogachev DA, Rogachev AF. Justification of Parameters Modifiable for Genetic Algorithms of Artificial

Intelligence for Solving Multi-criteria Optimization Problems. In: Ranganathan G, Papakostas GA, Shi Y. (eds.). *Inventive Communication and Computational Technologies. ICICCT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer: Singapore; 2024;23:899–910. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7710-5_70 EDN: YUELQB

20. Sadovnikova NP, Lvova YS, Sanzhapov BKh. Conceptual model of the process of decision-making support in conditions of uncertainty of background information using the ontological approach. *Open education*. 2011; (2-2):185–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-2-90-97> EDN: EUXQJO

21. Zakharov DS. Application of modified genetic algorithms for solving evolutionary problems of the theory of schedules. *Herald of Daghestan state technical university. Technical sciences*. 2023;50(2):90–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-2-90-97>

22. Rogachev AF, Zakharov DS. The use of modified genetic algorithms for scheduling. *Innovative development of the construction complex of the region: problems, status, prospects. II All-Russian scientific-practical conf. Mikhailovka-Volgograd*, 15 October 2019, 2020. P. 238–240. (In Russ.) EDN: LKZXSE

23. Badyorina LM, Boiko PS, Kisten VH, Solomko NO. The Technology Management of Quality of the Content of Education. *Journal of Engineering Education Transformations*. 2022;36(2):139–146. <https://doi.org/10.16920/jeet/2022/v36i2/22161>

24. Karpushova SE, Patsyuk EV, Zakharov DS., Ryzhova OA, Inkova NA. Database of the curriculum auto-generator / Database registration certificate RU 2023624808, 12.20.2023. Application dated 12.13.2023. EDN: KSTGPT

Список литературы

1. Gantt chart software for project management. URL: <https://www.atlassian.com/software/jira/features/gantt-chart-software> (accessed: 14.10.2024).

2. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 96 p.

3. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python. Москва : ДМК Пресс, 2020. 286 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/179496> (дата обращения: 12.09.2024).

4. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. 2-е изд., испр. и доп. Москва : ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2010. 366 с.

5. Gulivindala A.K., Raju Bahubalendruni M.V.A., Chandrasekar R., Ahmed E., Abidi M.H., Al-Ahmari A. Automated Disassembly Sequence Prediction for Industry 4.0 Using Enhanced Genetic Algorithm // *Computers, Materials & Continua*. 2021. Vol. 69. No. 2. P. 2531–2548. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018014> EDN: MKARYC

6. Shaaban A.M., Schmittner C., Gruber T., Mohamed A.B., Quirchmayr G., Schikuta E. Ontology-Based Security Requirements Framework for Current and Future Vehicles // *Data Science and Big Data Analytics in Smart Environments*. 2021. <https://doi.org/10.1201/9780367814397-11>

7. Bolbakov R.G., Mordvinov V.A., Tkachenko D.I. Meta-ontology in designing ontologies designing information management systems // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации : сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием : в 2 частях. Москва, 06–10 декабря 2021 года. Часть 1. Москва : РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. С. 252–255. EDN: UHCVYU

8. Лапишин В.А. Онтологии в компьютерных системах. Москва : Научный мир, 2010. 222 с. ISBN 978-5-91522-193-1 EDN: QMVAGJ

9. Винограй Э.Г. Основы общей теории систем. Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), 1993. 339 с. ISBN 5-230-18654-2 EDN: BIAPBH

10. Делия В.П. Инновационное мышление в XXI веке. Балашиха : Де-По, 2011. 227 с. ISBN 978-5-904147-12-9 EDN: QWYGPB

11. Olha T., Kostiantyn T., Oleksandr T. Designing Intelligent Multi-agent Ontology-Based Training Systems: The Case of State University of Infrastructure and Technology // *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2022. Vol. 463. P. 181–192. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_16 EDN: CDOOXL

12. Бубарева О.А., Попов Ф.А. Использование генетического алгоритма в контексте решения задачи нахождения семантической близости элементов неоднородных онтологий // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 29–32. EDN: RBPXNF

13. Алексеев А.П., Алексеева И.Ю. Информационная война в информационном обществе // Вопросы философии. 2016. № 11. С. 5–14. EDN: WZTMBZ

14. Бениаминов Е.М. Некоторые проблемы широкого внедрения онтологий в ИТ и направления их решений. URL: <http://beniaminov.rsuh.ru/BeniaminovOntoNew.pdf> (дата обращения: 14.10.2024).

15. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г. Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования. Москва : Изд-во: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. 92 с. ISBN: 978-5-91450-102-7 EDN: TOAILR

16. Лазарев А.А. Гафаров Е.Р. Теория расписаний задачи и алгоритмы. Москва : Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2011. 222 с.

17. Голяков С.М., Шилова А.Ю., Шилов Ю.М. Применение теории расписаний для организации учебного

процесса в общеобразовательных учреждениях // Наука и образование : сохраняя прошлое, создаём будущее, сборник трудов конференции : в 2 частях. Пенза, 10 декабря 2019 года. Часть 1. Пенза : Наука и Просвещение, 2019. С. 42–44. EDN: BLAXFV

18. *Смирнов С.В.* Онтологическое моделирование в ситуационном управлении // Онтология проектирования. 2012. № 2 (4). С. 16–24. EDN: OYRLIF

19. *Rogachev D.A., Rogachev A.F.* Justification of Parameters Modifiable for Genetic Algorithms of Artificial Intelligence for Solving Multi-criteria Optimization Problems // Inventive Communication and Computational Technologies. ICICCT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems / G. Ranganathan, G.A. Papakostas, Y. Shi (eds.). Springer, Singapore. 2024. Vol. 23. P. 899–910. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7710-5_70 EDN: YUELQB

20. *Садовникова Н.П., Львова Ю.С., Санжапов Б.Х.* Концептуальная модель процесса поддержки принятия решений в условиях неопределенности исходной информации на основе онтологического подхода // Открытое образование. 2011. № 2–2. С. 185–187. EDN: OCZOJP

21. *Захаров Д.С.* Применение модифицированных генетических алгоритмов для решения эволюционных задач теории расписаний // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50. № 2. С. 90–97. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-2-90-97> EDN: EUXQJO

22. *Рогачев А.Ф., Захаров Д.С.* Использование модифицированных генетических алгоритмов для составления расписаний // Инновационное развитие строительного комплекса региона: задачи, состояние, перспективы : материалы II Всероссийской научно-практической конференции Михайловка–Волгоград, 15 октября 2019 года, 2020. С. 238–240. EDN: LKZXHE

23. *Badyorina L.M., Boiko P.S., Solomko N.O., Kisten V.H.,* The Technology Management of Quality of the Content of Education // Journal of Engineering Education Transformations. 2022. Vol. 36. No. 2. P. 139–146. <https://doi.org/10.16920/jeet/2022/v36i2/22161> EDN: OQUXGO

24. *Карпушова С.Е., Пацюк Е.В., Захаров Д.С., Рыжова О.А., Инькова Н.А.* База данных автогенератора учебных расписаний / Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023624808, 20.12.2023. Заявка от 13.12.2023. EDN: KSTGPT

About the authors

Aleksey F. Rogachev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems in Economics, Volgograd State Technical University, 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8413-5020, ORCID: 0000-0002-3077-6622; e-mail: rafr@mail.ru

Dmitry S. Zakharov, Applicant, Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Natural Sciences, Sebyakovsky branch of Volgograd State Technical University, 21 Michurina St, Mikhailovka, Volgograd region, 403343, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-6665-510X; e-mail: zakator@bk.ru

Сведения об авторах

Рогачев Алексей Фруминович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем в экономике, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр-кт им. Ленина, 28; eLIBRARY SPIN-код: 8413-5020, ORCID: 0000-0002-3077-6622; e-mail: rafr@mail.ru

Захаров Дмитрий Сергеевич, соискатель, старший преподаватель кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, Российская Федерация, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21; ORCID: 0009-0009-6665-510X; e-mail: zakator@bk.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-52-62

EDN: KECVOZ

Научная статья / Research article

Математическое моделирование управления организационными проектами

К.И. Подкин[✉], Ю.А. Назарова^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ 1142220974@pfur.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 ноября 2024 г.

Доработана: 27 декабря 2024 г.

Принята к публикации: 12 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Представлена новая математическая модель, направленная на повышение точности прогнозирования и эффективности управления организационными проектами в условиях неопределенности. Актуальность исследования обусловлена растущей сложностью проектов и необходимостью разработки инструментов для минимизации рисков и оптимизации ресурсов. Цель исследования — создание математического аппарата для оценки влияния различных факторов на динамику выполнения проекта и разработка механизмов управления, устойчивых к внешним воздействиям. Проведен анализ существующих подходов к управлению проектами, разработана математическая модель на основе теории систем и теории управления. Для построения модели использовался системный подход, который помог учесть взаимосвязи между различными элементами проекта. Модель учитывает такие факторы, как неопределенность, ресурсные ограничения и динамику процессов. Результатом исследования стал инструмент для прогнозирования и оптимизации управления проектами. Модель помогает идентифицировать потенциальные риски и разрабатывать эффективные стратегии их минимизации. Научная новизна работы заключается в разработке новой математической модели, учитывающей специфику организационных проектов для точного прогнозирования их результатов. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной модели для повышения эффективности управления проектами в различных организациях.

Ключевые слова: математическая модель, управление проектами, динамические системы, оптимизация, прогнозирование, ресурсные ограничения

Вклад авторов:

Подкин К.И. — разработка моделей, анализ, сбор данных; Назарова Ю.А. — разработка общей концепции, научное руководство.

Для цитирования:

Подкин К.И., Назарова Ю.А. Математическое моделирование управления организационными проектами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 52–62. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-52-62>

© Подкин К.И., Назарова Ю.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Mathematical Modeling of Organizational Project Management

Kirill I. Podkin[✉], Yulia A. Nazarova^{id}

RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ 1142220974@pfur.ru

Article history

Received: November 16, 2024

Revised: December 27, 2024

Accepted: January 12, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. A new mathematical model is presented aimed at improving the accuracy of forecasting and the effectiveness of managing organizational projects in conditions of uncertainty. The relevance of the study stems from the growing complexity of projects and the need to develop tools to minimize risks and optimize resources. The aim of the study is to create a mathematical apparatus that allows assessing the influence of various factors on the dynamics of the project and developing management mechanisms that are resistant to external influences. To achieve this goal, an analysis of existing approaches to project management was conducted, a mathematical model was developed based on systems theory and control theory. A systematic approach was used to build the model, which helped to account for the interrelationships between the various elements of the project. The model takes into account such factors as uncertainty, resource constraints and process dynamics. The results of the study allowed us to create a tool for forecasting and optimizing project management. The model helps to identify potential risks and develop effective strategies to minimize them. The scientific novelty of the work lies in the development of a new mathematical model that takes into account the specifics of organizational projects in order to accurately predict their results. The practical significance of the study lies in the possibility of using the developed model to improve the efficiency of project management in various organizations.

Keywords: mathematical model, project management, projects, uncertainty, dynamic systems, optimization, forecasting, resource constraints

Authors' contribution:

Podkin K.I. — model development, data collection and analysis; Nazarova Yu.A. — development of a general concept, scientific guidance.

For citation:

Podkin KI, Nazarova YuA. Mathematical modeling of organizational project management. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):52–62. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-52-62>

Введение

Сложный процесс управления организационными проектами, сфера, в которой стратегические видения трансформируются в осязаемую реальность, представляет собой сложное взаимодействие человеческих усилий, технологических инноваций и организационной структуры. В основе моделирования организационных проектов лежит стремление к знаниям, стремление понять основополагающие принципы и динамику, которые определяют успешное выполнение проекта.

Математическое моделирование — современный инструмент, основанный на стремлении переводить сложности управления проектами в математические уравнения и алгоритмы, чтобы выявить скрытые закономерности, предвидеть потенциальные проблемы и оптимизировать процессы принятия решений [1]. Математический подход дает возможность разобратся в сложной сети переменных, влияющих на результаты проекта, таких как распределение ресурсов, управление рисками и управление командой. С помощью тщательного анализа и моделирования можем изучить влияние раз-

личных стратегий и определить наиболее перспективные пути к успеху проекта.

Однако применение математического моделирования в управлении проектами — подход, требующий понимания основополагающих допущений и ограничений используемых моделей [2; 3]. Поэтому крайне важно признать присущие математическим моделям ограничения и использовать их как инструменты для принятия обоснованных решений, а не как неисправимых ошибок. Сочетая количественный анализ с качественным, мы можем получить целостное представление об управлении проектами и составлять надежные прогнозы.

По сути, математическое моделирование служит связующим звеном между абстрактным миром теории и конкретными реалиями проектной практики [4]. Предоставляя структурированную основу для анализа и принятия решений, руководители организационных проектов справляются с неопределенностями и вызовами, которые неизбежно возникают в ходе их работы. Поскольку область управления проектами продолжает развиваться, роль математического моделирования будет возрастать [5; 6].

1. Обзор литературы

В современной организационной среде проекты все чаще используются в качестве стратегических инструментов для достижения долгосрочных бизнес-целей. Успешное выполнение этих проектов имеет первостепенное значение для общего успеха организаций. Следовательно, управление организационными проектами превратилось в важнейшую стратегическую дисциплину, которую организации должны принять для обеспечения успешной реализации проектов. Однако, несмотря на значительный прогресс в методологиях и инструментах управления проектами, эмпирические данные свидетельствуют о том, что уровень успешности организационных проектов остается относительно неизменным.

М. Aubry основное внимание уделяет офисам управления проектами (ОУП) и организационному дизайну. Автор исследует, как управ-

ляющие компании структурированы и размещены внутри организаций для эффективной поддержки реализации проектов и достижения стратегических целей [7–9]. Анализируя взаимосвязь между ОУП и организационным проектом, она дает ценную информацию о том, как можно использовать ОУП для повышения эффективности работы организации.

R. Chia подчеркивает важность использования различных точек зрения и парадигм для достижения всестороннего понимания сложных проектных явлений. Автор критически рассматривает ограничения традиционных исследовательских подходов и выступает за инновационные и междисциплинарные методы [10]. Он исследует, как создаются знания и как ими делятся в сообществах по управлению проектами, подчеркивая роль как формальных, так и неформальных процессов обучения.

M.M. De Carvalho, F.J.B. Laurindo, M.S. de P. Pessoa сосредоточились на понимании основополагающих принципов и рамок, которые определяют эффективную практику управления проектами. Авторы разработали и оценили различные организационные модели управления проектами, выделив их сильные и слабые стороны. Практически их исследование дает информацию о том, как организации могут внедрять модели управления проектами для повышения своей эффективности и достижения стратегических целей [11].

Исследование W.A. De Oliveira и de C.F. Muijder посвящено потенциалу управления проектами в организации для создания ценности. На основе анализа конкретных примеров авторы исследуют, как эффективное управление проектами может способствовать успеху организации и ее конкурентным преимуществам [12].

Исследования неизменно демонстрируют сильную взаимосвязь между возможностями организации в области управления проектами и уровнем успешности ее проектов [13]. Организации с хорошо отлаженными процессами управления проектами, квалифицированными менеджерами проектов и поддерживающей организационной культурой с большей веро-

ятностью будут реализовывать проекты в срок, в рамках бюджета и в соответствии с требуемыми стандартами качества.

Модели зрелости управления проектами (Project Management Maturity — РММ) обеспечивают ценную основу для оценки возможностей организации в области управления проектами. Оценивая различные аспекты управления организационными проектами, такие как планирование, исполнение, мониторинг и контроль, модели РММ могут помочь организациям определить сильные и слабые стороны и области, требующие улучшения [14]. Понимая свой текущий уровень зрелости, организации могут разрабатывать целенаправленные стратегии для совершенствования своей практики управления организационными проектами, тем самым улучшая результаты проекта [15].

Модель зрелости управления проектами (РММ) выступает в качестве ключевого инструмента для оценки и повышения способности организации эффективно реализовывать организационные проекты. Представляя собой систематическую структуру, РММ определяет текущий уровень развития процессов управления проектами и выявляет области для совершенствования. Исследования демонстрируют прямую корреляцию между уровнем зрелости управления проектами и вероятностью успешной реализации организационных проектов [16]. Непрерывное совершенствование процессов управления проектами является основополагающим принципом, обеспечивающим повышение общей эффективности организации.

РММ и основанные на ней модели служат стратегическим инструментом, направленным на оптимизацию процессов управления организационными проектами и, как следствие, повышение вероятности достижения организационных целей [17]. Несмотря на то, что роль проектов в современной организации неоспорима, особенно в контексте крупных и сложных инициатив, успешная реализация проектов зависит от наличия зрелых и эффективных про-

цессов управления. Таким образом, применение моделей зрелости управления организационными проектами помогает организациям не только оценить текущие возможности, но и разработать стратегии для развития и совершенствования процессов управления проектами, что в конечном итоге способствует повышению их конкурентоспособности.

Концепция организационного управления проектами (Organizational Project Management — ОРМ) направлена на систематизацию и интеграцию всех аспектов управления проектами в контексте организационной структуры. Исторически сложилось так, что ОРМ возникло в ответ на необходимость согласования организационных проектов с долгосрочными стратегическими целями организации [18]. Первоначальные модели ОРМ акцентировали внимание на интеграции проектов, программ и портфелей посредством установления единых процессов и политик. Однако современные исследования выявили необходимость анализа взаимосвязей между различными аспектами ОРМ, такими как управление изменениями, управление реализацией выгод и другими [19]. Несмотря на признание важности этих аспектов для успешного внедрения ОРМ, существующие модели не всегда адекватно отражают их взаимозависимость и взаимовлияние.

Прогнозируется, что в течение 2025 г. среднегодовой темп роста рынка программного обеспечения, предназначенного для управления организационными проектами, продемонстрирует устойчивую динамику и достигнет значения в 10,17 %, что свидетельствует о существенном расширении данного сегмента информационных технологий¹. Несмотря на то, что в настоящее время использование специализированного программного обеспечения для управления организационными проектами характеризуется относительно невысокой распространенностью в сравнении с другими информационными системами. Ожидается, что по мере эволюции и усложнения организационных структур,

¹ Статистика управления проектами: тенденции и распространенные ошибки в 2024 году. URL: <https://teamstage.io/project-management-statistics/> (дата обращения: 23.10.2024)

а также возрастания масштабов деятельности корпораций данные системы приобретут критически важное значение в обеспечении эффективного управления рабочей нагрузкой, рационального распределения ресурсов, а также контроля и оптимизации бюджетных показателей, что обусловит их повсеместное внедрение и интеграцию в бизнес-процессы. Таким образом, учитывая возрастающую потребность в комплексном управлении проектами в условиях динамично развивающейся бизнес-среды, можно констатировать, что тенденция роста рынка программных средств управления проектами (Project Management Software, PMS) сохранит свою актуальность и достигнет прогнозируемого значения, что подчеркивает значимость данного направления в развитии современных управленческих технологий.

2. Методы исследования

Методы, используемые для написания статьи: математическое моделирование, анализ данных, сравнительный анализ научных исследований. Для достижения поставленной цели был проведен анализ существующих подходов к управлению проектами, разработана математическая модель на основе теории систем и теории управления. Разработана модель, которая учитывает такие факторы, как неопределенность, ресурсные ограничения и динамику процессов.

3. Результаты

Результаты анализа свидетельствуют о значительной неопределенности в процессе выполнения организационных проектов, которые проявляются в систематических отклонениях от плановых показателей. Для повышения эффективности управления организационными проектами разработана методология, которая поможет идентифицировать и количественно оценить факторы, вызывающие неопределенность, а также разработать механизмы управления организационными проектами, которые будут устойчивы к внешним воздействиям и обеспечат достижение поставленных целей.

Для повышения точности прогнозирования объема выполнения проектов в условиях неопределенности разработан математический аппарат, чтобы оценить влияние различных факторов на динамику выполнения организационного проекта:

$$Y = f[U, X, Q, N], \quad (1)$$

где Y — начальные, промежуточные и конечные процессы (объемы выполнения) организационных проектов; U — выходные (промежуточные) процессы (объемы выполнения) проектов; X — ресурсы, необходимые для выполнения задач (запланированные объемы) проектов; Q — параметры процессов выполнения организационного проекта, на которые влияет объективная неопределенность проекта; N — отклонение объема работ от ожидаемого выполнения, которое может быть связано с ошибками в управлении или выполнении организационного проекта.

Компоненты векторов входящие (промежуточные) продукта проектов известны, а ресурсы X задают ограничения посредством неравенств типа $X \leq X_{\text{доп}}$.

Следовательно, прогнозирование состояния Y управляемого объекта на модели может быть получено с точностью до параметра Q , относительно которого известно, что он принадлежит некоторому множеству $Q \in \Omega$. Этот параметр будем называть естественным состоянием неуправляемого поведения организационных проектов.

Если в процессе выполнения организационных проектов не выделять величину неуправляемого параметра Q , то ее аддитивное накопление может привести к тому, что показатели отклонения объема выполнения проекта от плановых значений в динамике будут расти. В процессе реализации организационного проекта максимальные отклонения от целевого результата имеют тенденцию к увеличению. Из-за неконтролируемых параметров значение вектора отклонения может достигать точки, когда оно превышает пределы возможностей субъекта по компенсации. Поэтому данное состояние

является критическим и требует проактивного подхода к управлению организационным проектом для обеспечения эффективности и результативности достижения целей в рамках заданных задач.

Цель состоит в том, чтобы достичь разумных количественных значений параметров (индикаторов), составляющих ожидаемый результат организационного проекта Y , который должен быть достигнут в ходе выполнения проектных мероприятий. В управлении организационными проектами, которое представляет собой систему дискретных действий, завершающихся достижением цели, достаточно, чтобы показатель $Y(t)$, относящийся к данной цели, находился в пределах заданного диапазона. На пути к достижению конечной цели также может быть установлен ряд промежуточных целей для мониторинга прогресса в реализации организационного проекта.

Для того чтобы исследовать необходимые и достаточные параметры и механизмы проактивного управления организационными проектами в организационном развитии энергетических компаний с задачей достижения конкретной цели, необходимо создать модель целевой функции для управления динамикой их процессов.

После определения общей структуры системы для проектов организационного развития в энергетических компаниях и их целей определяются и впоследствии конкретизируются отдельные функциональные подсистемы и компоненты. Взаимосвязи между компонентами системы отражаются в различных моделях, которые служат для координации взаимодействий между элементами, определяя формы взаимосвязей, переменные, ограничения и показатели. Визуальное представление структуры формализовано с помощью серии целенаправленных информационных дисплеев. На концептуальном уровне представление проблемных ситуаций в их качественном аспекте, охватывающем природу потребностей, формирует основу для создания модели, которая лежит в основе стратегий активного управления проектами организационного развития.

На основе проведенного исследования нами предложена модель целевой функции пошагового процесса управления динамикой проектов организационного развития. Модель, изображенная на рисунке, учитывает пространство параметров, траекторию базового плана и приемлемые процессы (действия), необходимые для достижения цели организационного проекта на каждом этапе в фазе начального планирования.

Координаты состояния объекта управления определяются с использованием параметров, связанных со стоимостью проектных работ, необходимых для достижения цели, и соответствующих временных рамок. Изменение состояний преобразования продукта описывается траекторией перемещения отображаемой точки в пространстве состояний. С помощью структурного представления модель отражает образы динамики сценария наблюдения за преобразованием продукта проектов из состояния «как есть» S_0 в состояние «как должно быть» S_n :

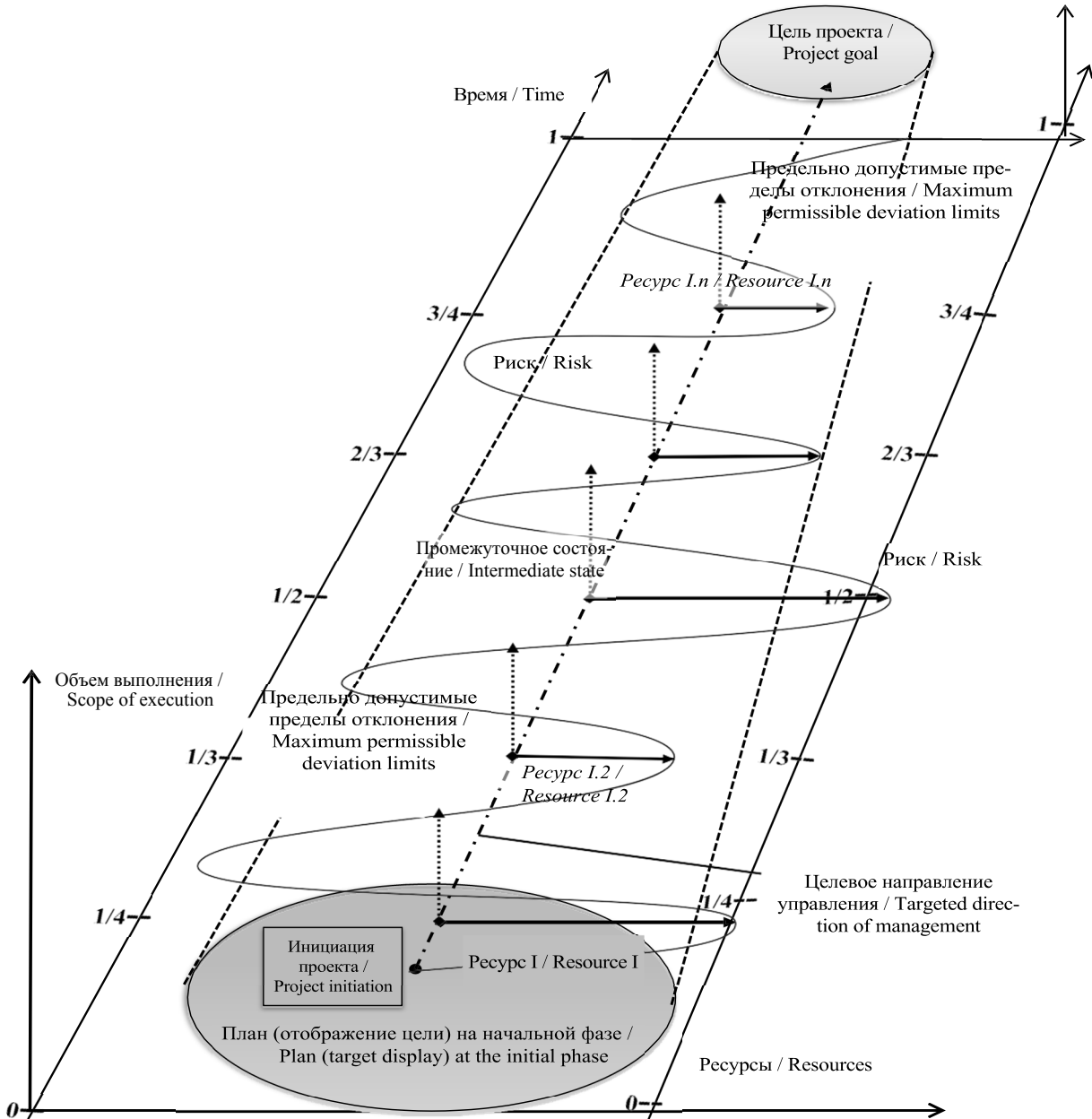
- основные начальные параметры бюджета и время (срок) его завершения;
- целевую область с центром, заданным координатами начальных параметров;
- траекторию «идеальных» состояний достижения цели;
- последовательность n фаз проектов.

Используя механизм объективного контроля, их ожидаемые и пороговые значения рассчитываются на основе текущих значений рабочих параметров проекта. Визуальное представление статуса выполнения проекта оперативно оценивает изменения тенденций по сравнению со статистическим анализом.

Модель предназначена для обеспечения информационной поддержки проактивного подхода и процесса принятия упреждающих решений, а также объединяет пять важнейших аспектов процесса управления, но целевая функция является совокупной на каждом этапе организационного проекта:

$$Fsk(x) = [fk(xk) + Fk - 1(x - xk)], \quad (2)$$

где $fk(xk) = S_k$ — показатель промежуточного состояния на k -м шаге.



Модель целевой функции управления динамикой процессов проекта организационного развития энергокомпании

Источники: выполнено К.И. Подкиным, Ю.А. Назаровой

Model of the objective function of process dynamics management of the organizational development project of an energy company

Source: created by K.I. Podkin, Y.A. Nazarova

Состояние системы S_k на каждом k -м шаге управления зависит от предыдущего состояния системы S_{k-1} и управляющего действия D_k на k -м шаге:

$$S_k = D_k(S_{k-1}, x_k), \quad k = 1, n, \quad (3)$$

где D_k — оператор действия.

Показатели конечной цели организационного проекта достигаются путем выполнения управленческих действий. Конечное состояние S_z проектов (цель) является итогом (k) промежуточных состояний проектов:

$$S_z = F(S_0, x) + \sum_{i=1}^n [f_{k-1}(x_{k-1}) + Fk(x - x_{k-1})]. \quad (4)$$

Модель проактивного управления проектами организационного развития предлагается формулировать следующим образом: найти такое значение управляемой переменной x^* , которое переводит систему из начального состояния $S_0, x_{(0)} = x_0$ в конечное состояние $S_n, x_{(T)} = x_T$ так, чтобы целевая функция достигла минимального отклонения от ожидаемого значения. Достижение сформулированной модели обеспечивается проектными мерами в оперативном управлении организационными проектами.

Случайный характер процессов управления организационными проектами, проявляющийся в вариациях ожидаемых результатов, расширяет спектр возможных решений и затрудняет достижение целей. Для обеспечения устойчивости и эффективности управления организационными проектами необходимо обеспечить целеустремленность действий на каждом этапе и динамическое равновесие процессов. Учитывая статистический характер технических характеристик проекта, представленных случайными величинами, и случайный характер объема выполненных работ, задача управления заключается в максимизации среднего значения показателя качества при одновременной минимизации его дисперсии. То есть необходимо достичь компромисса между эффективностью и стабильностью процессов.

Поскольку объем выполнения работ организационных проектов Y изменяется случайным образом с дисперсией $D(Y)$, то выборочное среднее $\bar{Y}$ имеет дисперсию объема выборки. Отсюда если дисперсия $B(H)$ уменьшается, то вероятность того, что значение $\bar{Y}$ близко к $M(y)$, увеличивается и показывает целесообразность введения критерия, в котором максимизация ожидаемого значения показателя качества процессов управления Q сочетается с минимизацией ее дисперсии в $D(y)$:

$$Q = M(Y) - KD(Y), \quad (5)$$

где K — коэффициент ($K > 0$).

Величина коэффициента K определяет степень весомости величины дисперсии Y отно-

сительно $M(Y)$ и интерпретирует уровень невосприимчивости к рискам. Например, если рисковыми в организационных проектах являются большие отрицательные отклонения объемов Y от $M(x)$, то K выбирают больше единицы и повышается значимость различий в процессах принятия управленческих решений, которые приводят к принятию управленческих решений, тем самым снижая вероятность значительных отклонений от ожидаемых результатов. Вышеупомянутые показатели выполнения проекта подлежат оценке до начала организационного проекта и должны корректироваться на протяжении всего запланированного срока его реализации в соответствии с проактивным подходом.

Как правило, превосходных результатов можно достичь, решая задачу выявления и оценки параметров отклонений с помощью тщательно структурированной модели и оперативного анализа данных. Следовательно, становится необходимым применять методологии управления организационными проектами, используя передовые информационные технологии, чтобы гарантировать своевременный сбор необходимых данных.

Информация о состоянии объекта управления оказывает непосредственное влияние на объем и качество прогнозирования, анализа состояния и принятия решений в рамках проактивного подхода.

По нашему мнению, крайне важно определить фундаментальную структуру, лежащую в основе отклонений результатов разработки системы управления организационными проектами от ожидаемого состояния. Особенно это актуально в проактивном управлении организационными проектами, где неопределенность присуща прогнозирующей природе модели управления. Ключевым компонентом проактивного подхода часто является вероятностный механизм, отражающий случайные воздействия различных факторов. Более того, при ограниченном количестве контрольных точек может не хватить данных для эффективной реализации принципов проактивного подхода, что может помочь устранить субъективные факторы.

Объективная неопределенность проектного риска может быть классифицирована как приемлемая или неприемлемая в зависимости от ее влияния на конкретную цель организационного проекта. Если неопределенность будет сочтена неприемлемой, то может привести к потере контроля над организационным проектом. Неопределенность в отношении достижения целей организационного проекта в первую очередь определяется адекватностью информации, доступной проектной команде. Также имеют значение знания о предсказуемости процессов и результатов проекта, о потенциальных последствиях управленческих ошибок.

Компенсация за отклонения от установленных пределов часто происходит постфактум, что делает ее неэффективной. Проактивное управление предполагает оценку влияния прогнозируемых отклонений на каждом этапе на общую цель организационного проекта. Если ожидается отрицательный результат, принимаются меры по снижению риска, чтобы предотвратить неблагоприятный исход по результатам цели проекта. При оценке отклонений и их потенциальных последствий определенные значения считаются приемлемыми, в то время как другие классифицируются как рискованные.

Критические отклонения классифицируются как приемлемые или рискованные на основе оценки достаточности имеющихся ресурсов для принятия обоснованных решений относительно корректировки потоков ресурсов с целью смягчения этих отклонений и, следовательно, изменения состояния проектов. В контексте вероятностных результатов ключевым аспектом в процессе упреждающей формулировки решений, направленных на достижение удовлетворительных результатов в управлении проектами организационного развития, является чередой позитивных и негативных событий. По событиям проводится критическая оценка состояния организационного проекта по отношению к его ожидаемой стоимости, что приводит к принятию решений.

Выбор вариантов в процессе формулирования гипотез для принятия решений относи-

тельно стабильности динамичной ситуации основан на оценке достаточности ресурсов организационного проекта. Преимущество проактивного подхода в управлении организационным проектом заключается в том, что заблаговременное прогнозирование выявляет ошибки в проекте, которые еще не привели к негативным последствиям, но могут привести к ним в будущем или могут быть предотвращены с помощью превентивных мер.

Процесс проактивного управления является итеративной процедурой принятия решений, которая включает анализ и выявление закономерностей в информации, касающейся негативных тенденций в моделях, и структурных параметров вероятного состояния рассматриваемой системы Sk на каждом k -м шаге. Одновременно проводится оценка максимально допустимых уровней отклонений, учитывающая как неконтролируемые отклонения, так и потенциальные риски. Данные, полученные в ходе процесса оценки, служат основой для проактивных действий, направленных на предотвращение потери контроля, чтобы обеспечить эффективность управления организационного проекта. Следовательно, оценку качества управления нельзя рассматривать как самостоятельную категорию, поскольку можно построить множество оценок качества управления организационным проектом на основе одного и того же вектора ошибок (оценки не всегда уместны и эффективны).

Анализ процессов реализации проекта с использованием модели должен воспроизвести проектный процесс в информационном пространстве. Данная модель построена на основе исходного состояния и математической зависимости, которая определяет показатели промежуточных результатов проекта и общие результаты проекта.

Путем включения фактических значений показателей в исходную модель на каждом этапе уточняются параметры проектов, которые еще не были завершены. Процесс приводит к изменению ширины диапазонов прогнозируемых значений показателей, а также выявлению критических ситуаций.

На основе этих данных формулируются решения, направленные на завершение организационного проекта. В зависимости от цели, выбранного критерия оптимальности и характера ограничений можем классифицировать задачи на те, которые направлены на минимизацию отклонений от заданных целевых показателей.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что проактивный подход к управлению организационными проектами предполагает формирование гипотез о будущем состоянии проекта на основе прогнозных моделей. Проактивный подход поможет своевременно выявлять потенциальные риски и разрабатывать альтернативные сценарии развития, что повышает гибкость управления и адаптивность к изменениям внешней среды организационного проекта. Благодаря проактивному подходу ресурсы организационного проекта оптимизируются, поскольку управление фокусируется на ключевых аспектах проекта, а не на достижении чрезмерной точности.

Заключение

Проведенное исследование было направлено на разработку математической модели для управления динамикой организационных проектов в условиях неопределенности. Анализ существующих подходов выявил недостаточную эффективность традиционных методов применительно к сложным и динамичным проектам. В рамках исследования разработана новая математическая модель, которая сможет прогнозировать выполнение организационного проекта и принимать обоснованные управленческие решения. Модель учитывает факторы, влияющие на ход проекта, в том числе неопределенность, ресурсные ограничения и внешние воздействия. Основным преимуществом разработанной модели является ее способность к адаптации к изменяющимся условиям и учету неопределенности. Кроме того, модель может быть использована для оптимизации распределения ресурсов и минимизации рисков. Перспективным направлением дальнейших исследова-

ний является развитие модели с учетом таких факторов, как человеческий фактор, организационная культура и внешняя среда. Также представляет интерес применение модели в различных отраслях и типах проектов для оценки ее универсальности.

В заключение отметим, что разработанная математическая модель представляет собой ценный инструмент для управления организационными проектами. Ее применение повысит эффективность управления, снизит риски и поможет достичь поставленных целей.

Список литературы / References

1. Williams T. The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. *IMA Journal of Management Mathematics*. 2003;14(1):3–30. <https://doi.org/10.1093/imaman/14.1.3>
2. Simard M, Aubry M, Laberge D. The utopia of order versus chaos: A conceptual framework for governance, organizational design and governmentality in projects. *International Journal of Project Management*. 2018;36(3):460–473. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.01.003>
3. Turner JR. The management of the project-based organization: A personal reflection. *International Journal of Project Management*. 2017;36(1):231–240. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.08.002>
4. Jugdev K. Strengthening the Connections between strategy and organizational project management. *Cambridge Handbook of Organizational Project Management*. 2017;44–54. <https://doi.org/10.1017/9781316662243.007>
5. Mitrev M, Mancini M, Turner R. Towards a design for the project-based organization. *International Journal of Project Management*. 2017;35(3):479–491. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2016.12.007>
6. Mitrev M, Turner JR, Mancini M. The organization design perspective on the project-based organization: a structured review. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2017;10(3):527–549. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-06-2016-0048>
7. Aubry M, Hobbs B, Thuillier D. A new framework for understanding organizational project management through the PMO. *International journal of project management*. 2007;25(4):328–336. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.01.004>
8. Aubry M, Lavoie-Tremblay M. Organizing for the management of projects: The project management office in the dynamics of organizational design. *The Cambridge handbook of organizational project management*. 2017;119–133. <https://doi.org/10.1017/9781316662243.013>
9. Aubry M, Lavoie-Tremblay M. Rethinking organizational design for managing multiple projects. *Inter-*

national Journal of Project Management. 2017;36(1):12–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.05.012>

10. Chia R. Paradigms and perspectives in organizational project management research: Implications for knowledge-creation. *Novel approaches to organizational project management research-Translational and transformational*. 2013;33–55. ISBN 9788763002493

11. De Carvalho MM, Laurindo FJB, De Paula Pessoa MS. Organizational project management models. *Encyclopedia of Information Science and Technology*. IGI Global Scientific Publ.; 2009;2941–2947. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-026-4.ch470>

12. de Oliveira WA, de Muylder CF. Value creation from organizational project management: A case study in a government agency. *Journal of Information Systems and Technology Management*. 2012;9(3):497–514. <https://doi.org/10.4301/378>

13. Görög M. A broader approach to organizational project management maturity assessment. *International Journal of Project Management*. 2016;34:1658–1669. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.08.011>

14. Anantamula VS, Rad PF. Role of organizational project management Maturity factors on project success.

Engineering Management Journal. 2018;30(3):165–178. <https://doi.org/10.1080/10429247.2018.1458208>

15. Cooke-Davies T, Arzymanow A. The maturity of project management in different industries: An investigation into variations between project management models. *International Journal of Project Management*. 2003;21(6):471–478. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00084-4)

16. Mowday RT, Sutton RI. Organizational behavior: linking individuals and groups to organizational contexts. *Annual Review of Psychology*. 1993;44(1):195–229. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.44.020193.001211>

17. Zwikael O, Chih Y, Meredith JR. Project benefit management: Setting effective target benefits. *International Journal of Project Management*. 2018;36(4):650–658. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.01.002>

18. Müller R. Organizational project governance. *Governance and Governmentality for Projects: Enablers, practices and consequences*. 2016;11–24. <https://doi.org/10.4324/9781315683294-9>

19. Müller R, Drouin N, Sankaran S. Modeling organizational project management. *Project Management Journal*. 2019;50(4):499–513. <https://doi.org/10.1177/8756972819847876>

Сведения об авторах

Подкин Кирилл Игоревич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9852-6322, ORCID: 0000-0002-9116-3897; e-mail: 1142220974@pfur.ru

Назарова Юлия Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru

About the authors

Kirill I. Podkin, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9852-6322, ORCID: 0000-0002-9116-3897; e-mail: 1142220974@pfur.ru

Yulia A. Nazarova, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-63-76

EDN: KLQRSX

Научная статья / Research article

Разработка алгоритма поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта

А.А. Бойков[✉], Ю.А. Назарова^{id}, Д.А. Семенов^{id}, И.В. Шишкин^{id},
Е.А. Маликов^{id}, К.И. Подкин^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ 1042200032@pfur.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 октября 2024 г.

Доработана: 20 декабря 2024 г.

Принята к публикации: 15 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Предложен алгоритм поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта, например, учредителей, соучредителей, ключевых участников любого проекта, организации, стартапа. Предложенный алгоритм представлен в методологии IDEF0, которая позволяет показать логические связи в графическом виде на основе диаграмм, включающих в себя блок-схемы с использованием специализированных элементов, а именно: входов, механизмов, управления, выходов, блоков и функций. Основным преимуществом разработанного алгоритма является наглядность, компактность, возможность опционального видоизменения алгоритма и его конвертации в различные логические методологии, программный или математический код с целью дальнейшего применения, например, для создания специализированного программного обеспечения, внедрения в алгоритмы искусственного интеллекта, аудита структур различных организаций. Новизна исследования заключается в отсутствии аналогичных работ в рассматриваемой области с применением методологии IDEF0, а также в применении нестандартных элементов, которые ранее не рассматривались или применялись, но нечасто, в более консервативных методах рекрутирования, вербовки или подбора персонала и кадров. Результаты исследования могут быть использованы для вновь формирующихся команд, занимающихся созданием новых продуктов, запуском стартапа, проведением исследований и в целом для любых проектов, предполагающих наличие в будущем той или иной организационной системы.

Ключевые слова: функциональный блок, функциональная модель, алгоритм, функциональный метод, инновационная идея, управление системами, команда проекта, IDEF0

Вклад авторов:

Бойков А.А. — концепция исследования, разработка алгоритма, написание текста, формирование блок-схем; Назарова Ю.А. — общее руководство научной работой; Семенов Д.А. — сбор и обработка материалов, предоставление программного обеспечения; Шишкин И.В. — сбор и обработка материалов, подготовка списка литературы; Маликов Е.А. — сбор материалов, подготовка списка используемой литературы; Подкин К.И. — поиск и перевод иностранной литературы, корректура текста.

Для цитирования:

Бойков А.А., Назарова Ю.А., Семенов Д.А., Шишкин И.В., Маликов Е.А., Подкин К.И. Разработка алгоритма поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 63–76. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-63-76>

© Бойков А.А., Назарова Ю.А., Семенов Д.А., Шишкин И.В., Маликов Е.А., Подкин К.И., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Development of an Algorithm for Searching Candidates to Form the Initial Project Team

Anton A. Boykov[✉], Yulia A. Nazarova^{OR}, Dmitry A. Sementsov^{OR},
Ilya V. Shishkin^{OR}, Evgeny A. Malikov^{OR}, Kirill I. Podkin^{OR}

RUDN University, Moscow, Moscow, Russian Federation
✉ 1042200032@pfur.ru

Article history

Received: October 15, 2024

Revised: December 20, 2024

Accepted: January 15, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. In this study the authors propose an algorithm for identifying candidates to form the initial project team, such as founders, co-founders, and key participants of any project, organization, or startup. The proposed algorithm is presented using the IDEF0 methodology, which allows for the graphical representation of logical connections through diagrams that include flowcharts utilizing specialized elements, namely: inputs, mechanisms, controls, outputs, blocks, and functions. The primary benefit of the developed algorithm is its clarity and compactness. Additionally, it is modifiable and convertible into different logical methodologies, programs, or mathematical code for further application. For instance, it can be utilized in the creation of specialized software, the implementation of artificial intelligence algorithms, and the auditing of structures in various organizations. The novelty of the research lies in the absence of similar works in the field using the IDEF0 methodology, as well as in the application of non-standard elements that have not been previously considered or have been used infrequently in more conservative methods of recruiting or personnel selection. The results of the study can be utilized for newly forming teams aiming to create new products, launch startups, conduct research, and generally for any projects that anticipate the establishment of some organizational system in the future.

Keywords: functional block, functional model, algorithm, functional method, innovative idea, systems management, project team, IDEF0

Authors' contribution:

Boykov A.A. — research concept, algorithm development, text drafting, and flowchart creation; Nazarova Yu.A. — overall supervision of the scientific work; Sementsov D.A. — data collection and processing, software provision; Shishkin I.V. — data collection and processing, reference list drafting; Malikov E.A. — data collection, reference list drafting; Podkin K.I. — search and translation of foreign literature, manuscript revision.

For citation:

Boykov AA, Nazarova YuA, Sementsov DA, Shishkin IV, Malikov EA, Podkin KI. Development of an algorithm for searching candidates to form the initial project team. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):63–76. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-63-76>

Введение

Успех и дальнейшее существование любого вновь создаваемого и развиваемого проекта во многом зависит от первичной команды проекта [1–3]. За всемирно известными корпорациями стоят не менее известные истории их учредителей и команд, нацеленных на развитие развития своих проектов. Учредители получали опыт и расширяли свои компетенции по мере

развития организаций, зачастую при этом находясь не в самых комфортных условиях [4–7].

Обычно процесс поиска первичной команды любого проекта не структурирован и представляет собой удачное стечение случайных обстоятельств [8]. Возможно, такой подход может привести к успеху проектов, однако является ненаучным. Существуют некоторые научные труды и теории, в рамках которых авторы пытаются показать влияние случайности

и удачи на успех в проектах [9; 10]. Отдельно стоит обратить внимание на теорию слабых связей за авторством Марка Грановеттера, в которой утверждается, что менее близкие связи могут оказаться более полезными для получения новой информации, ресурсов и материалов [11]. При этом целесообразно структурировать процесс поиска первичной команды исходя из необходимых вводных данных.

Основная цель исследования — создание алгоритма поиска первичной команды любого проекта. Алгоритм выполнен в нотации IDEF0 в связи с тем, что впоследствии его возможно использовать при создании программного обеспечения, обучении нейронных сетей и искусственного интеллекта, а также в связи с компактностью и наглядностью функциональных моделей [12].

1. Материалы и методы

Авторами статьи был разработан алгоритм в виде графических блок-схем, представленных в диаграммах согласно нотации IDEF0. Функциональное моделирование в нотации IDEF0 было осуществлено в соответствии с руководящим документом «Методология функционального моделирования IDEF0» и рекомендацией по стандартизации Р 50.1.028–2001¹ [13; 14]. Алгоритм представлен с точки зрения главного инициатора или группы инициаторов, которым может выступать лидер группы, программное обеспечение или другие единицы или группы единиц.

На рис. 1 представлена контекстная диаграмма верхнего уровня A(1)-0. Диаграмма состоит из одного блока, описывающего основную функцию.

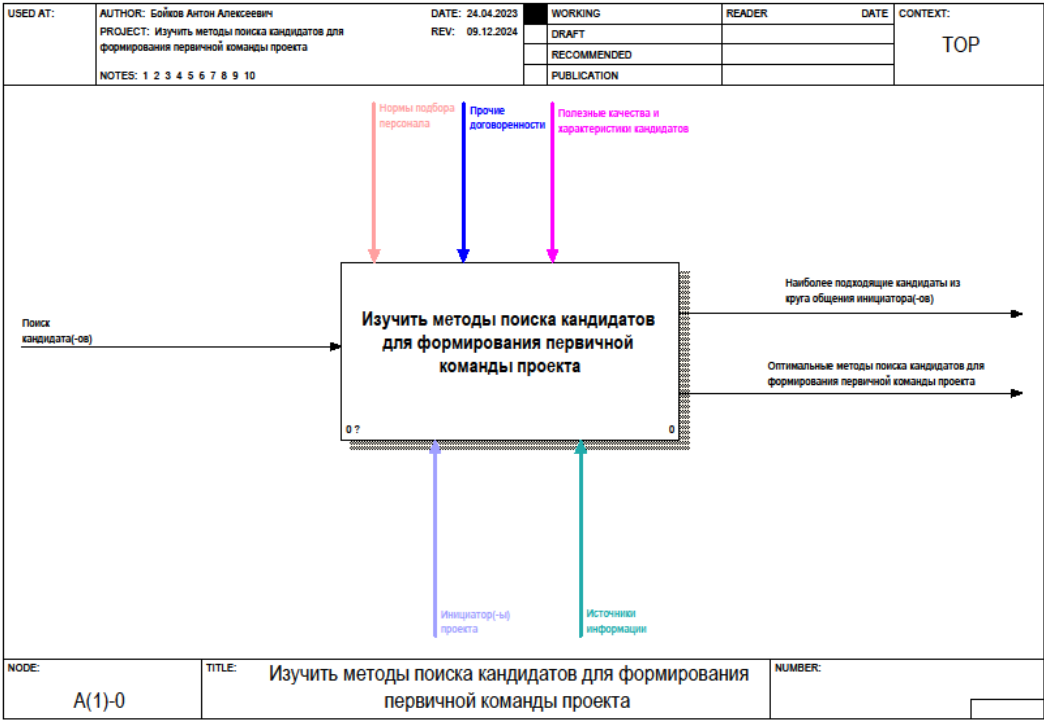
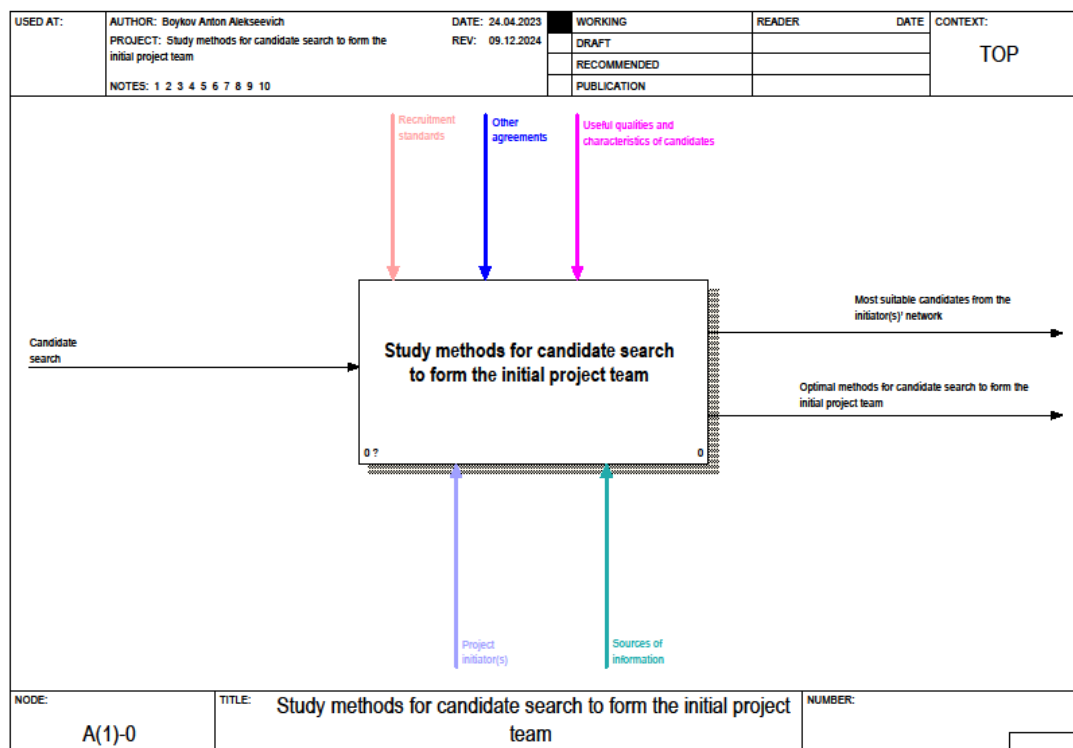


Рис. 1. Диаграмма верхнего уровня (A(1)-0)
Источник: выполнено А.А. Бойковым

¹ Методология функционального моделирования IDEF0. Москва : Госстандарт России, 2000. 75 с.

**Figure 1.** Top-level diagram (A(1)-0)

Source: made by A.A. Boykov

Модель построена с точки зрения инициатора(-ов) проекта. В диаграммах по методологии IDEF0 отображаются основные элементы: *входы, управление, механизмы, выходы* и *сами блоки*.

Представленные *механизмы* диаграммы верхнего уровня:

1. Инициатор(-ы) проекта.
2. Источники информации.

Представленный *вход* диаграммы верхнего уровня:

1. Поиск кандидатов.

Представленные *управления* диаграммы верхнего уровня:

1. Нормы подбора персонала.
2. Прочие договоренности.
3. Полезные качества и характеристики кандидатов.

Представленные *выходы* диаграммы верхнего уровня:

1. Наиболее подходящие кандидаты из круга общения инициатора(-ов).

2. Оптимальные методы поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта.

Все вышеперечисленные элементы осуществляют те или иные задачи, например, идентифицируют средства, поддерживают выполнение *функции* основного блока, определяют условия, а также *функции*, необходимые для осуществления верных *выходов*, которые являются результатом алгоритма. Впоследствии контекстная диаграмма верхнего уровня декомпозируется на обычные диаграммы более низких уровней. Процесс декомпозиции может быть бесконечным, и чем больше декомпозиций, тем точнее работает алгоритм, однако это не имеет прагматического смысла, так как создается как визуальная перегрузка, так и смысловая [13].

На рис. 2 представлены основные *функции* поиска первичной команды проекта. Диаграмма содержит комплексные *блок-схемы*, расположенные как параллельно, так и последовательно.

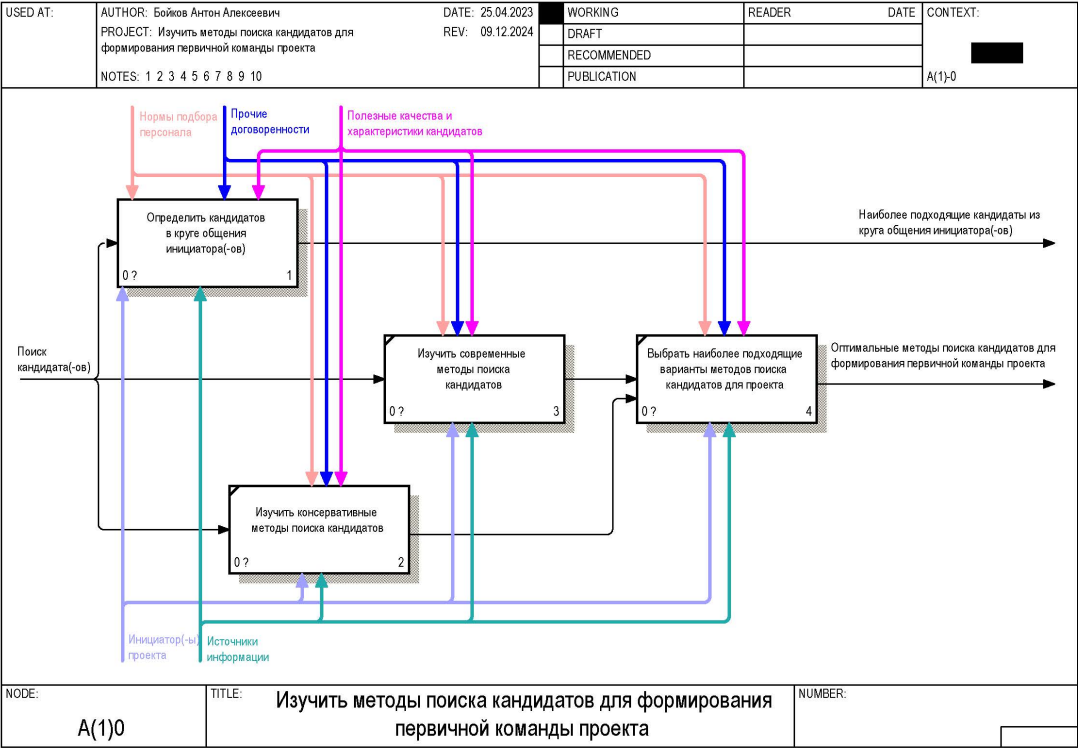


Рис. 2. Диаграмма (A(1)0). Основные функции
И с т о ч н и к : выполнено А.А. Бойковым

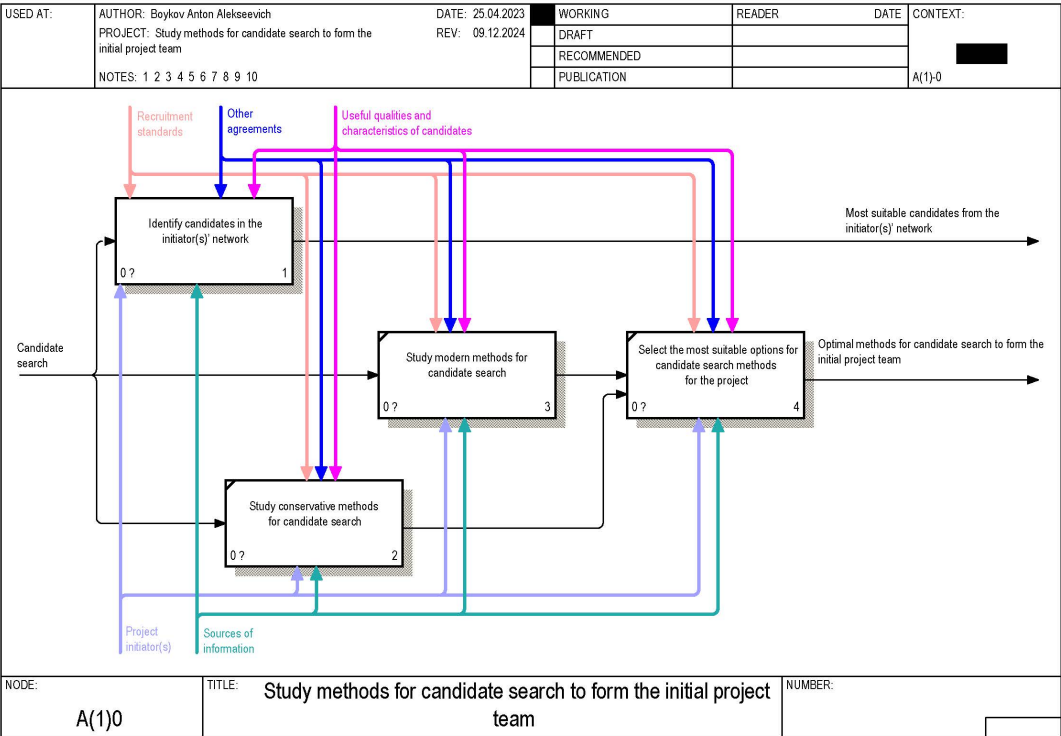


Figure 2. Diagram (A(1)0). Main functions
S o u r c e : made by A.A. Boykov

В диаграмме автором предложена последовательность основных *функций*: определение кандидатов для первичной команды проекта из личного круга общения инициатора(-ов), изучение консервативных методов поиска кандидатов, изучение современных методов поиска кандидатов и выбор наиболее подходящих вариантов метода поиска кандидатов. Упор в рамках разработанного алгоритма делается на *функцию* определения кандидатов для первичной команды проекта из личного круга общения инициатора(-ов) в связи с тем, что данный процесс в меньшей степени структурирован [14; 15]. Изучение консервативных и современных методов поиска кандидатов, а впоследствии выбор наиболее подходящих вариантов на основании *механизмов* — источников информации, компетенций инициатора(-ов) проекта, а также на основании *управлений* — норм подбора персонала, полезных качеств кандидатов и других договоренностей дает в результате *выход* — оптимальные методы поиска кандидатов. Таким

образом, рассматриваемых, а затем выбранных кандидатов можно подключить для изучения консервативных и современных методов подбора кандидатов.

На рис. 3 представлена декомпозиция *функции* «Определить кандидатов в круге общения инициатора(-ов)». Каждая из представленных *функций* на данной диаграмме также будет декомпозирована. Процесс на указанной диаграмме представляет логическую последовательность подбора кандидатов из круга общения инициатора(-ов), их сортировку и окончательный выбор подходящих из кандидатов, отсортированных для участия в проекте.

На рис. 4 представлена декомпозиция *функции* «Предположить, какие люди из круга общения инициатора(-ов) могли бы быть полезны в реализации проекта». Она необходима для подбора первичного пула кандидатов, входящих в первичную команду проекта. На данном этапе очень важен подбор наиболее подходящих *механизмов* и *управления*.

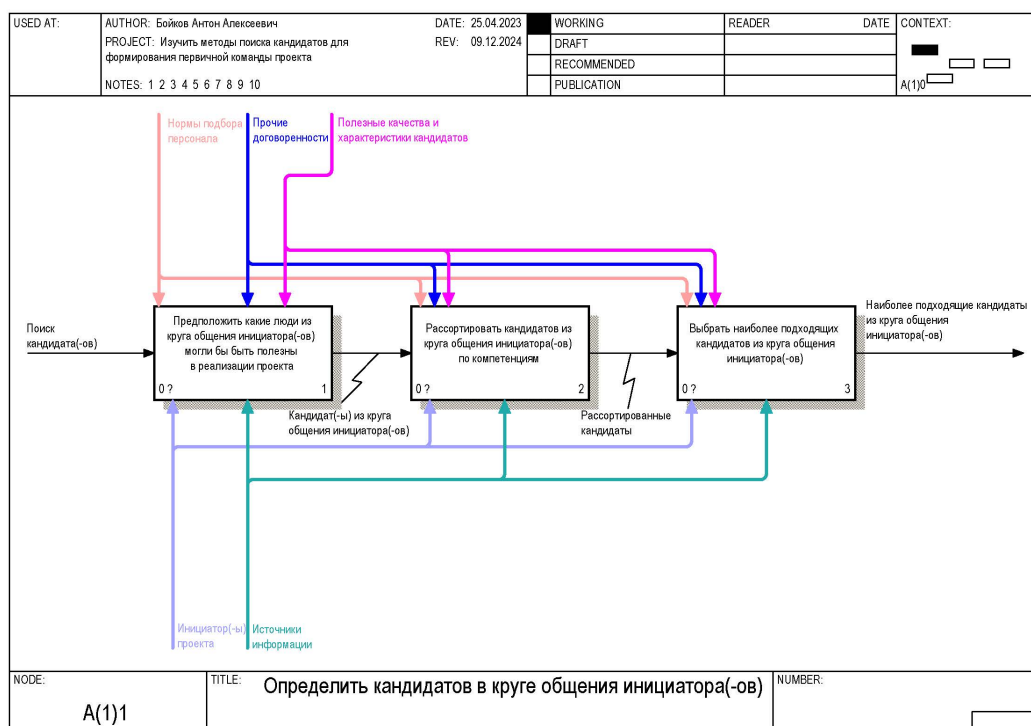


Рис. 3. Диаграмма (A(1)1). Декомпозиция функции «Определить кандидатов в круге общения инициатора(-ов)»

Источники: выполнено А.А. Бойковым

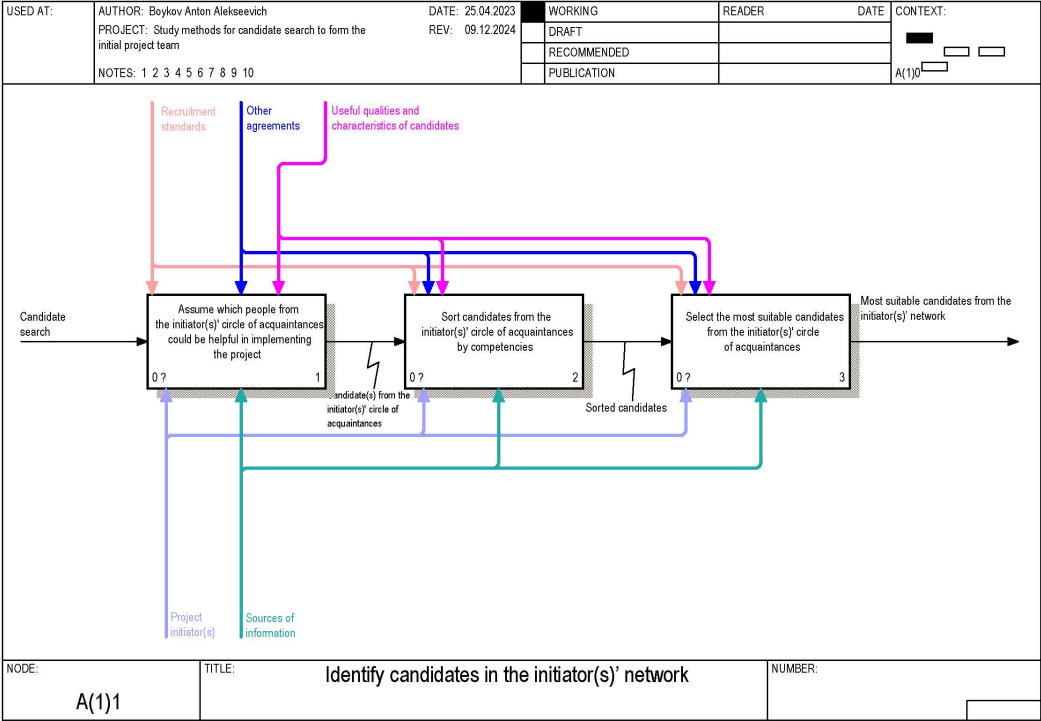


Figure 3. Decomposition of the function «Identify candidates in the initiator(s)' network»
Source: made by A.A. Boykov

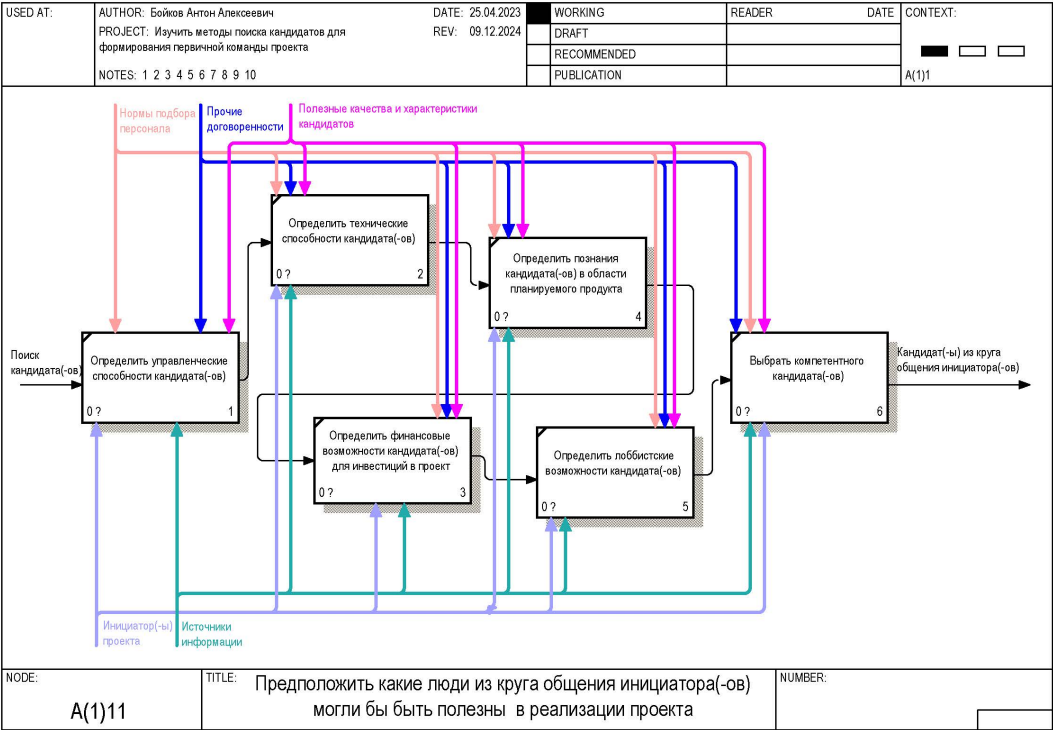


Рис. 4. Диаграмма (A(1)11). Декомпозиция функции «Предположить, какие люди из круга общения инициатора(-ов) могли бы быть полезны в реализации проекта»
Источник: выполнено А.А. Бойковым

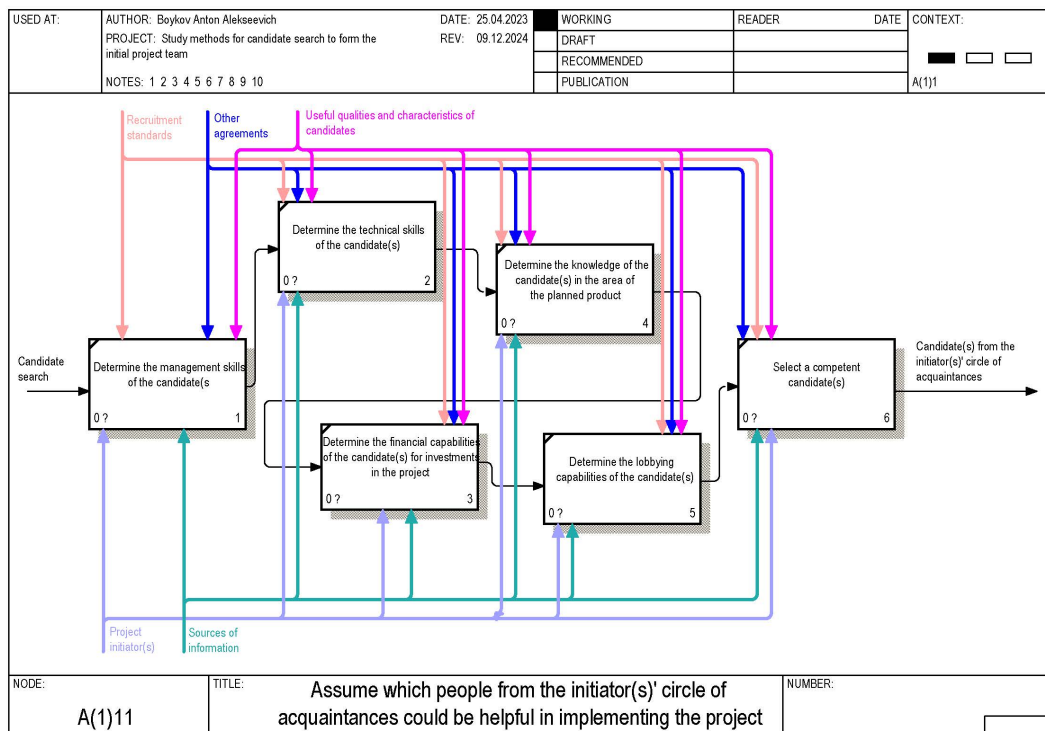


Figure 4. Decomposition of the function “Assume which people from the initiator(s)’ circle of acquaintances could be helpful in implementing the project”

S o u r c e: made by A.A. Boykov

Определяя способности кандидата, следует полагаться на потенциальные первичные потребности в проекте. Кандидат может иметь способности и компетенции как в каждой из рассматриваемой областей, так и в различных комбинациях этих способностей и компетенций. Если у инициатора(-ов) проекта недостаточно собственных навыков для определения компетенций каждого из кандидатов, то возможно обратиться к экспертному мнению, а также к различным источникам информации. Авторы статьи предлагают использовать в качестве источников информации специализированную литературу или различные виды тестирований кандидатов [16–21].

На рис. 5 изображена декомпозиция функции «Рассортировать кандидатов из круга общения инициатора(-ов) по компетенциям». Диаграмма визуально выглядит переполненной, однако в действительности отражает простую логику последовательной сортировки рассмат-

риваемого кандидата — переход от любого блока функции к следующему, ранее не рассмотренному. В процессе сортировки немаловажным является распределение рассматриваемого кандидата в те или иные группы, например, по приоритету способностей — от сильных характеристик к слабым и наоборот, комбинаций способностей, а также другим всевозможным вариантам [22–26].

На рис. 6 изображена декомпозиция функции «Выбрать наиболее подходящих кандидатов из круга общения инициатора(-ов)». Функциями в рассматриваемой диаграмме являются определение оптимального количества кандидатов для проекта с учетом уровня его развития, исключение отсеянных кандидатов, сравнение компетенций и навыков отсортированных ранее кандидатов, определение степени незаменимости кандидатов после сравнения их компетенций и обозначение предварительных ролей в проекте для выбранных кандидатов.

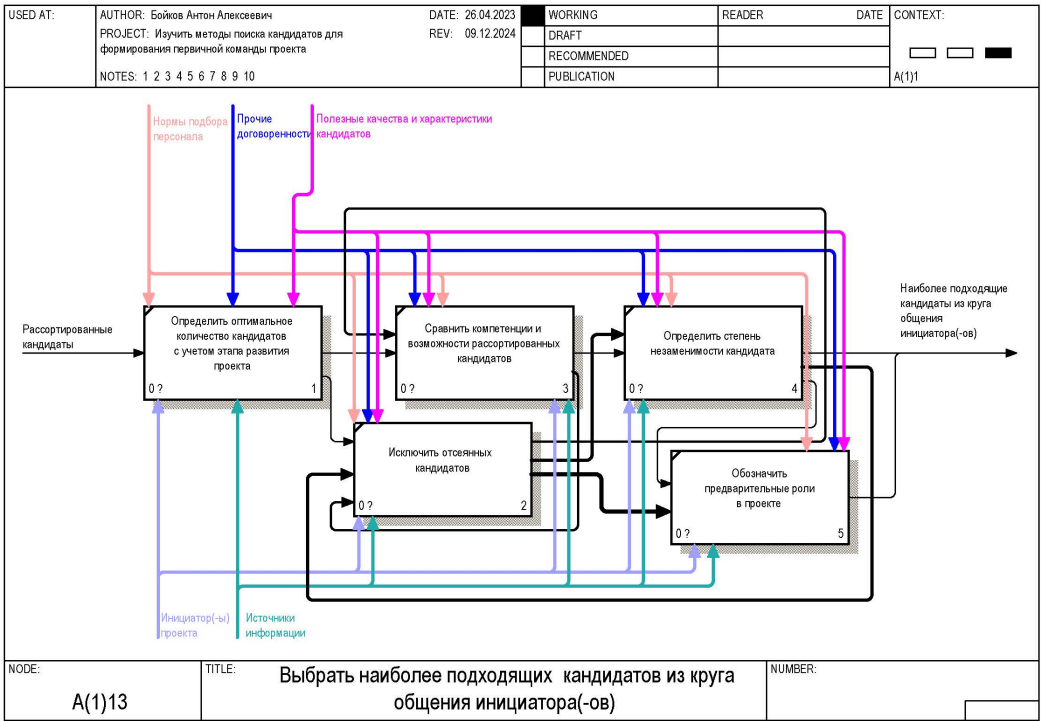


Рис. 5. Диаграмма (A(1)12). Декомпозиция функции «Рассортировать кандидатов из круга общения инициатора(-ов) по компетенциям»
И с т о ч н и к: выполнено А.А. Бойковым

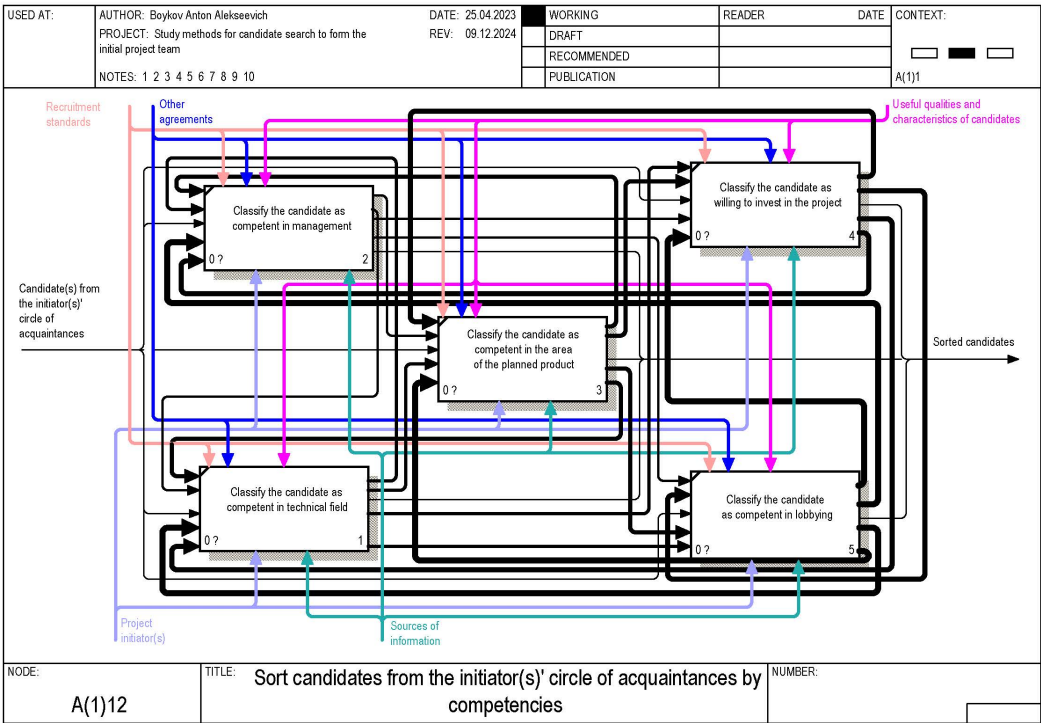


Figure 5. Decomposition of the function “Sort candidates from the initiator(s)’ circle of acquaintances by competencies”
S o u r c e: made by A.A. Boykov

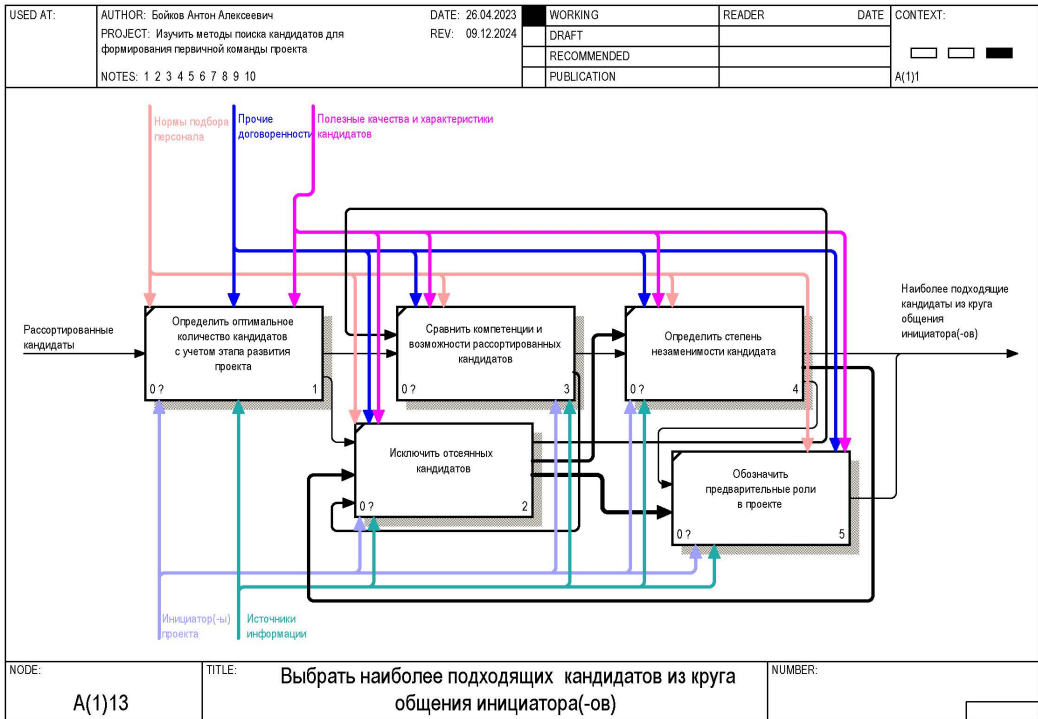


Рис. 6. Диаграмма (A(1)13). Декомпозиция функции «Выбрать наиболее подходящих кандидатов из круга общения инициатора(-ов)»
Источник: выполнено А.А. Бойковым

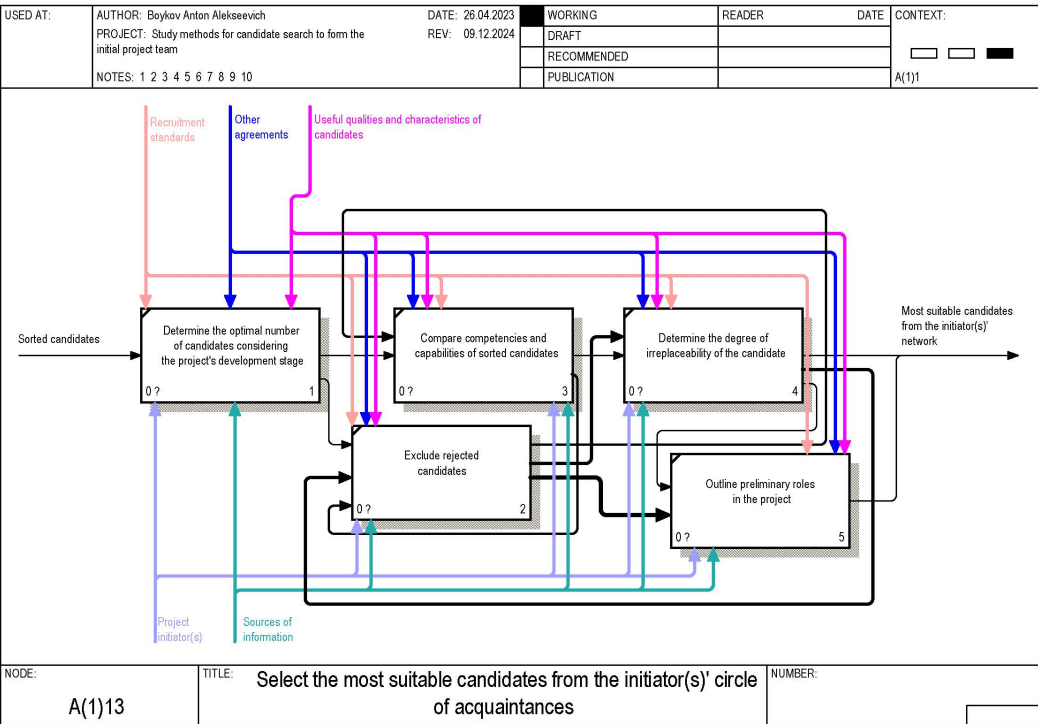


Figure 6. Decomposition of the function “Select the most suitable candidates from the initiator(s)' circle of acquaintances”
Source: made by A.A. Boykov

Авторы обращают внимание на то, что оптимальное количество кандидатов для проекта может быть различным и индивидуальным в каждом рассматриваемом случае, однако авторы рекомендуют не превышать количество членов первичной команды более 5 человек или других субъектных единиц в связи с тем, что на практике команды с большим числом участников впоследствии прекращают свое существование [27–30]. Данная рекомендация не распространяется на глобальные проекты, проекты больших масштабов, а также на вновь создаваемые проекты в рамках уже существующих и отлаженных организационных структур.

2. Результаты и обсуждение

Результатом исследования является разработанный алгоритм поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта в нотации IDEF0. Разработанный алгоритм возможно использовать для комплексного поиска кандидатов для формирования первичной команды проекта, автоматизации процесса поиска, а также преобразования алгоритма в программируемый логический контроллер или специализированное программное обеспечение. Алгоритм выполнен на базе программного обеспечения AllFusion Process Modeler.

Разработанный алгоритм может быть оптимизирован, доработан и представлен в других нотациях. Вероятно, основные функции изучения консервативных и современных методов поиска кандидатов стоило декомпозировать, однако это целесообразнее сделать в отдельном научном труде в связи с тем, что компактность и наглядность алгоритма в таком случае ухудшится в разы. Также, вероятно, экспертное мнение необходимо было вывести в отдельный механизм, однако оно также может считаться источником информации, поэтому целесообразность данного действия сомнительна, но может потребоваться при оптимизации алгоритма для тех или иных решений при применении в различном программном обеспечении. На основании данного алгоритма возможна разработка дополнительного алгоритма формирования первичной команды проекта.

Заключение

Функциональная модель построена с учетом экспертного мнения авторов и их практического опыта. Использование алгоритма на практике может оказать влияние на динамику создания новых инновационных проектов с более длительным сроком жизни в связи с более упорядоченным выбором наиболее релевантных кандидатов первичной команды проекта, которые впоследствии могут составить основу для формирования более стабильной команды на следующих этапах развития различных проектов. В целом данный алгоритм может положительно повлиять на инновационный потенциал Российской Федерации.

Список литературы

1. *Артемюва И.В.* Учредитель и наблюдательный совет // Советник бухгалтера бюджетной сферы. 2012. № 8. С. 34–48. EDN: RIOATV
2. *Кананчев З.В.* Сравнительный анализ роли учредителя в системе негосударственной образовательной организации: российский и зарубежный опыт // Bulletin of the International Centre of Art and Education. 2023. № 6–2. С. 327–334. EDN: JPUPYA
3. *Птуха Н.И.* Формирование управленческих команд. Москва : НПО «Эко планет», 2014. 200 с. ISBN 978-5-9903528-9-6 EDN: HHIAWC
4. *Crowley A.R.* Google It: A History of Google. Macmillan + ORM, 2018. ISBN 1-250-14821-9
5. *Linzmayr O.W.* Apple Confidential 2.0: The Definitive History of the World's Most Colorful Company. San Francisco : No Starch Press, 2004. 344 p. ISBN 1-59327-010-0
6. *Kirkpatrick D.* The Facebook Effect: The Inside Story of the Company That Is Connecting the World. Simon and Schuster Publ., 2010. 384 p. ISBN 1-4391-0980-X
7. *Wallace J., Erickson J.* Hard Drive: Bill Gates and the Making of the Microsoft Empire. Wiley Publ., 1992. ISBN 0-471-56886-4
8. *Becker L., Muller T.* Get Lucky: How to Put Planned Serendipity to Work for You and Your Business. Jossey-Bass Publ., 2012. ISBN 978-1-118-27693-8
9. *Topus D.* Talk to Strangers: How Everyday, Random Encounters Can Expand Your Business, Career, Income, and Life. John Wiley & Sons, 2012. 208 p. ISBN 9781118228418
10. *De Klerk S., Kroon J.* Business networking relationships for business success // South African Journal of Business Management. 2008. Vol. 39. No. 2. P. 25–35. <https://doi.org/10.4102/sajbm.v39i2.558>

11. *Granovetter M.* The strength of weak ties: A network theory revisited // *Sociological theory*. 1983. Vol. 1. P. 201–233. <https://doi.org/10.2307/202051>
12. *Пронкина А.Г.* Аналитический обзор методологий моделирования бизнес-процессов организаций // *Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2023): сборник научных трудов XXVI Российской научной конференции (молодежная секция) : в 2 томах, Москва, 29–30 ноября 2023 года. Москва : Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2024. С. 174–181. EDN: WWPHTR*
13. *Усков А.А., Жукова А.Г.* Подход к оценке сложности диаграмм SADT (IDEF0) // *Программные продукты и системы*. 2015. № 1 (109). С. 34–37. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.109.034-037> EDN: TPOWWH
14. *Колесникова Е.В., Лукьянов Д.В., Шерстюк О.И.* Оценка эффективности командной работы на стадии инициации проектов // *Управление развитием складных систем*. 2015. № 21 (1). С. 37–42.
15. *Бочкина О.Н., Морозов М.Н.* Команда проекта : подходы к построению и условия эффективного функционирования // *Новая наука: Опыт, традиции, инновации*. 2016. № 6–1(89). С. 156–158. EDN: WCJKKV
16. *Мякушкин Д.Е.* Формирование управленческого состава организации: основные этапы процесса отбора, обучения и практической подготовки группы кадрового резерва // *Психология. Психофизиология*. 2010. № 40 (216). С. 69–75. EDN: NYGEQL
17. *Judijanto L., Towpek H., Syahrin M.* Best recruitment and selection practices based on HRM literature review // *International journal of financial economics*. 2025. Vol. 2. No. 2. P. 258–264. URL: <https://ijefe.my.id/index.php/economic/article/view/164> (accessed: 17.07.2024)
18. *Barach J.* Integrating AI and HR Strategies in IT Engineering Projects: A Blueprint for Agile Success // *Emerging Engineering and Mathematics*. 2025. P. 1–13. URL: <https://emergingpub.com/index.php/em/article/view/42/33> (accessed: 17.07.2024)
19. *Азаров В.Н., Гудков Ю.Н.* Некоторые проблемы инженерной подготовки в области информационных технологий и пути их решения // *Вестник ИРГТУ*. 2015. № 3 (98). С. 233–238. EDN: TMYXQZ
20. *Бикмухаметов Т.И.* Влияние венчурного капитала на внедрение инноваций в России: магистерская диссертация по направлению подготовки: 38.04. 08 — Финансы и кредит. 2018. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:8549/SOURCE01> (дата обращения: 17.07.2024)
21. *Осипенко О.В., Коваленко А.И.* «Лоббирование интересов» как бизнес-практика // *Современная конкуренция*. 2024. Т. 18. № 4 (100). С. 112–127. <https://doi.org/10.37791/2687-0657-2024-18-4-112-127> EDN: LPLSZY
22. *Чикишева О.А.* Методы оценки персонала: группировка // *Труды Братского государственного университета*. Серия: Экономика и управление. 2008. Т. 1. С. 135–137. EDN: SCPHJX
23. *Новопавловская Е.Е., Тарасенко К.С.* Современные методы оценки персонала // *Управление человеческими ресурсами: теория, практика и перспективы : материалы международной молодежной научно-практической конференции*. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 230–233. EDN: JXXWKV
24. *Борискевич А.И., Карпенко Е.М.* Методы оценки лояльности персонала // *Беларусь — 2030: государство, бизнес, наука, образование : материалы VI Международной научной конференции*. Минск : Белорусский государственный университет, 2019. С. 292–294. EDN: QORSVY
25. *Гурбан А.Д., Чойдонов Б.Р., Савельева Е.Д.* Проблемы оценки персонала методом «360 градусов» // *Трансформация научных парадигм и коммуникативные практики в информационном социуме : VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых*. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 112–113. EDN: SBFAAZ
26. *Кириллова Ю.А.* Грейдинг как инновационный подход к оценке персонала // *Менеджмент качества и инновации — 2013 : сборник статей по материалам Шестой межрегиональной научно-практической конференции*. Великий Новгород, 14–15 ноября. Изд-во : Северный филиал РГУИТП, 2013. С. 144–146. EDN: UEDOWL
27. *Валитов Ш.М., Ахметов Ш.Т.* Особенности создания и реализации стартап-проектов в современной экономике // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2015. № 4. С. 17–22. EDN: VPUPML
28. *Денисенко Е.В., Малинин В.Л.* Скрам-метод управления инновационными проектами в машиностроении и оценка его эффективности (на примере автомобильного стартап проекта «Крым») // *Инновации и инвестиции*. 2018. № 5. С. 28–31. EDN: PRQNGY
29. *Choi J., Goldschlag N., Haltiwanger J., Kim J.D.* Founding teams and startup performance // *National Bureau of Economic Research*. 2021. P. 1–46. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3481850>
30. *Ahn Y., Greve H. R.* Cultural spawning: Founders bringing organizational cultures to their startup // *Organization Science*. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 411–428. <https://doi.org/10.1287/orsc.2023.17771>

References

1. *Artemova IV.* Founder and Supervisory Board. *Advisor of the Accountant in the Budget Sector*. 2012;(8): 34–48. (In Russ.) EDN: RIOATV
2. *Kananchev ZV.* Comparative analysis of a founder's role in a non-governmental educational organization system:

Russian and foreign experience. *Bulletin of the International Centre of Art and Education*. 2023;(6–2):327–334. (In Russ.) EDN: JPUPYA

3. Ptukha NI. *Formation of Management Teams*. Moscow: NPO “Eco Planet” Publ.; 2014. (In Russ.) ISBN 978-5-9903528-9-6

4. Crowley AR. *Google It: A History of Google*. Macmillan + ORM; 2018. ISBN 1250148219, 9781250148216

5. Linzmayer OW. *Apple Confidential 2.0: The Definitive History of the World's Most Colorful Company*. San Francisco: No Starch Publ.; 2004. ISBN 1593270100, 9781593270100

6. Kirkpatrick D. *The Facebook Effect: The Inside Story of the Company That Is Connecting the World*. Simon & Schuster Publ.; 2010. ISBN 143910980X, 9781439109809

7. Wallace J, Erickson J. *Hard Drive: Bill Gates and the Making of the Microsoft Empire*. Wiley Publ.; 1992. ISBN 0471568864, 9780471568865

8. Becker L, Muller T. *Get Lucky: How to Put Planned Serendipity to Work for You and Your Business*. Jossey-Bass Publ.; 2012. ISBN 9781118276938

9. Topus D. *Talk to strangers: How everyday, random encounters can expand your business, career, income, and life*. John Wiley & Sons Publ.; 2012. ISBN 9781118228418

10. De Klerk S, Kroon J. Business networking relationships for business success. *South African Journal of Business Management*. 2008;39(2):25–35. <https://doi.org/10.4102/sajbm.v39i2.558>

11. Granovetter M. The strength of weak ties: A network theory revisited. *Sociological theory*. 1983;1:201–233. <https://doi.org/10.2307/202051>

12. Pronkina AG. Analytical Review of Methodologies for Modeling Business Processes in Organizations. *Engineering of Enterprises and Knowledge Management (IEKM-2023): Collection of Scientific Papers of the XXVI Russian Scientific Conference (Youth Section)*: in 2 volumes, Moscow, November 29–30, 2023. (In Russ.) Moscow: G.V. Plekhanov Russian Economic University; 2024. p. 174–181. (In Russ.) EDN: WWPHTR

13. Uskov AA, Zhukova AG. An approach to SADT (IDEF0) difficulty evaluation. *Software and systems*. 2015; 1(109):34–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.109.034-037> EDN: TPOWWH

14. Kolesnikova EV, Lukyanov DV, Sherstyuk OI. Evaluating the effectiveness of teamwork at the stage of initiation of projects. *Management of the Development of Complex Systems*. 2015;21 (1):37–42. (In Russ.)

15. Bochkina ON., Morozov MN. Project Team: Approaches to Building and Conditions for Effective Functioning. *New Science: Experience, Traditions, Innovations*. 2016;6-1(89):156–158. (In Russ.) EDN: WCJKKV

16. Myakushkin DE. Formation of organization's management team: the basic stages of selection process, training and practical preparation of reserve group. *Psychology. Psychophysiology*. 2010;40(216):69–75. (In Russ.) EDN: NYGEQL

17. Judijanto L, Towpek H, Syahrin M. Best recruitment and selection practices based on HRM literature review. *International journal of financial economics*. 2025; 2(2):258–264. Available from: <https://ijefe.my.id/index.php/economic/article/view/164> (accessed: 17.07.2024)

18. Barach J. Integrating AI and HR Strategies in IT Engineering Projects: A Blueprint for Agile Success. *Emerging Engineering and Mathematics*. 2025. p. 1–13. Available from: <https://emergingpub.com/index.php/em/article/view/42/33> (accessed: 17.07.2024)

19. Azarov VN, Gudkov YuN. Some Problems of Engineering Training in the Field of Information Technologies and Ways to Solve Them. *Bulletin of IrGTU*. 2015; 3(98):233–238. (In Russ.) EDN: TMYXQZ

20. Bikmukhametov TI. *The Impact of Venture Capital on Innovation Implementation in Russia: Master's Thesis in the Field of Study: 38.04.08 — Finance and Credit*. 2018. (In Russ.) Available from: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:8549/SOURCE01> (accessed: 17.07.2024).

21. Osipenko OV, Kovalenko AI. “Lobbying Interests” as a Business Practice. *Journal of Modern Competition*. 2024;4(100):112–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.37791/2687-0657-2024-18-4-112-127> EDN: LPLSZY

22. Chikisheva OA. Methods for Evaluating Personnel: Grouping. *Proceedings of Bratsk State University Series Economics and Management*. 2008;1:135–137. (In Russ.) EDN: SCPHJX

23. Novopavlovskaya EE, Tarasenko KS. Modern Methods of Personnel Evaluation. *Human Resource Management: Theory, Practice, and Prospects: Materials of the International Youth Scientific and Practical Conference, Belgorod, April 20–21, 2023*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023. p. 230–233. (In Russ.) EDN: JXXWKV

24. Boriskovich AI, Karpenko EM. Methods for Assessing Employee Loyalty. *Belarus — 2030: State, Business, Science, Education: Materials of the VI International Scientific Conference*. Minsk : Belarusian State University; 2019. p. 292–294. (In Russ.) EDN: QORSVY

25. Gurban AD, Choydonov BR, Savelieva ED. Problems of Personnel Assessment Using the “360 Degrees” Method. *Transformation of Scientific Paradigms and Communicative Practices in the Information Society: VI All-Russian Scientific and Practical Conference for Students and Young Scientists*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2013. p. 112–113. (In Russ.) EDN: SBFAAZ

26. Kirillova YA. Grading as an Innovative Approach to Personnel Evaluation. *Quality Management and Innovations — 2013: Collection of Articles from the Sixth Interregional Scientific and Practical Conference, Veliky Novgorod, November 14–15, 2013*. Veliky Novgorod: Russian

State University of Innovative Technologies and Entrepreneurship (Northern Branch), 2013;144–146. (In Russ.) EDN: UEDOWL

27. Valitov ShM, Akhmetov ShT. Features of Creating and Implementing Startup Projects in the Modern Economy. *Intellect. Innovations. Investments*. 2015;(4):17–22. (In Russ.) EDN: VPUPML

28. Denisenko EV, Malinin VL. SCRAM-Method for Managing Innovation Projects in Engineering and Assessment of the Effectiveness of Its Applicatoin (on an Example of

an Automobile Startup Project “Crimea”). *Innovations and Investments*. 2018;(5):28–31. (In Russ.) EDN: PRQNGY

29. Choi J, Goldschlag N, Haltiwanger J, Kim JD. Founding teams and startup performance. *National Bureau of Economic Research*. 2021. p. 1–46. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3481850>

30. Ahn Y, Greve HR. Cultural spawning: Founders bringing organizational cultures to their startup. *Organization Science*. 2025;36(1):411–428. <https://doi.org/10.1287/orsc.2023.17771>

Сведения об авторах

Бойков Антон Алексеевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7501-3304, ORCID: 0000-0002-7991-5283; e-mail: 1042200032@pfur.ru

Назарова Юлия Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru

Семенов Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0001-5889-8277; e-mail: 1142220732@pfur.ru

Шишкин Илья Викторович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-9681-3176; e-mail: 1142230115@pfur.ru

Маликов Евгений Александрович, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: 1142221133@pfur.ru

Подкин Кирилл Игоревич, аспирант кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9852-6322, ORCID: 0000-0002-9116-3897; e-mail: 1142220974@pfur.ru

About the authors

Anton A. Boykov, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7501-3304, ORCID: 0000-0002-7991-5283; e-mail: 1042200032@pfur.ru

Yulia A. Nazarova, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8702-4283, ORCID: 0000-0002-5017-0281; e-mail: j.a.nazarova@mail.ru

Dmitry A. Sementsov, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-5889-8277; e-mail: 1142220732@pfur.ru

Ilya V. Shishkin, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-9681-3176; e-mail: 1142230115@pfur.ru

Evgeny A. Malikov, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-8656-9341; e-mail: 1142221133@pfur.ru

Kirill I. Podkin, PhD student of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9852-6322, ORCID: 0000-0002-9116-3897; e-mail: 1142220974@pfur.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-77-85

EDN: KQBSVP

Научная статья / Research article

Применение стохастических методов, вейвлет-преобразований и опорных векторов для исследования сигналов электроэнцефалограмм

В.В. Толманова^{id}, Д.А. Андриков^{id}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ andrikov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 июля 2024 г.

Доработана: 27 октября 2024 г.

Принята к публикации: 13 ноября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Исследовано применение современных методов обработки данных — вейвлет-преобразования, стохастических методов и метода опорных векторов (SVM) — на реальных сигналах электроэнцефалограмм (ЭЭГ) из открытых баз данных. Анализ ЭЭГ-сигналов имеет большое значение в медицинской диагностике и нейронауке, но требует сложных подходов из-за их высокой размерности и шумов. Метод вейвлет-преобразования используется для анализа сигналов во временно-частотной области, позволяет разбить сигнал на частотные составляющие с разными временными разрешениями. Стохастические методы базируются на вероятностных моделях и используются для моделирования случайных процессов и анализа статистических свойств данных. Метод опорных векторов — алгоритм машинного обучения, который находит оптимальную разделяющую гиперплоскость между классами, максимизируя зазор и обеспечивая хорошую обобщающую способность. SVM эффективно работает со сложными нелинейными данными. При сравнении этих методов следует учитывать их применимость к конкретным типам данных и задачам. Вейвлет-преобразование обычно используется в области обработки сигналов, стохастические методы применяются для моделирования случайных процессов, а SVM хорошо справляется с задачами классификации. Выбор метода зависит от характеристик данных и поставленных целей и может быть сделан на основе сравнительного анализа и оценки эффективности каждого метода в конкретном контексте. Рассмотрены концепции, методы и примеры применения указанных подходов на реальных данных ЭЭГ, что способствует более эффективному анализу и классификации мозговой активности, а также идентификации патологий и аномалий.

Ключевые слова: метод опорных векторов, электроэнцефалограмма, временные ряды, биомедицинские сигналы, алгоритмы машинного обучения

Вклад авторов:

Толманова В.В. — участие в разработке программ и их реализации; написание и доработка текста; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования; развитие методологии.

Для цитирования:

Толманова В.В., Андриков Д.А. Применение стохастических методов, вейвлет-преобразований и опорных векторов для исследования сигналов электроэнцефалограмм // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 77–85. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-77-85>

© Толманова В.В., Андриков Д.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Application of stochastic methods, wavelet transformations and support vectors for the study of electroencephalogram signals

Veronika V. Tolmanova^{id}, Denis A. Andrikov^{id}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ andrikov-da@rudn.ru

Article history

Received: July 25, 2024

Revised: October 27, 2024

Accepted: November 13, 2024.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Abstract. This study explores the application of modern data processing methods — wavelet transformation, stochastic methods, and Support Vector Machine (SVM) — on real electroencephalogram (EEG) signals from open databases. Analyzing EEG signals is crucial for medical diagnostics and neuroscience, requiring sophisticated techniques due to high dimensionality and noise. Wavelet transformation allows decomposition of signals into frequency components with varying temporal resolutions, facilitating time-frequency analysis. Stochastic methods utilize probabilistic models for modeling random processes and analyzing data statistics. Meanwhile, SVM is a machine learning algorithm that identifies the optimal hyperplane to separate classes, enhancing generalization, particularly with complex nonlinear data. When comparing these methods, the specific data type and task should be considered: wavelet transformation is ideal for signal processing, stochastic methods are used for random processes, and SVM excels in classification tasks. Thus, selecting the most suitable approach should be based on a comparative analysis of method effectiveness in a particular context. This study will discuss these concepts and present examples of applying these techniques to EEG data, contributing to the analysis and classification of brain activity and the identification of pathologies.

Keywords: support vector method, electroencephalogram, time series, biomedical signals, machine learning algorithms

Authors' contribution:

Tolmanova V.V. — the development of programs and their implementation; writing and revision of the text; *Andrikov D.A.* — scientific management; research concept; methodology development.

For citation:

Tolmanova VV, Andrikov DA. Application of stochastic methods, wavelet transformations and support vectors for the study of electroencephalogram signals. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):77–85. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-77-85>

Введение

В современном мире нейронауки и медицинской диагностики анализ сигналов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) играет ключевую роль в выявлении патологий мозга, исследовании активности мозга и понимании механизмов его работы. Однако обработка и анализ ЭЭГ-сигналов является сложной задачей из-за их высокой размерности, шумов и сложной структуры.

В данном исследовании рассмотрено применение современных методов обработки данных, таких как вейвлет-преобразование, стохастические методы и метод опорных векторов (SVM), на реальных данных ЭЭГ из открытых

баз данных. Вейвлет-преобразование используется для анализа частотных характеристик сигналов, что позволяет выделять особенности и структуру сигналов на разных временных и частотных масштабах.

Стратегии машинного обучения, такие как стохастические методы и SVM, являются мощными инструментами для классификации электрофизиологических сигналов. Их применение на реальных данных ЭЭГ позволяет эффективно выявлять патологии и аномалии, а также классифицировать активность мозга.

В ходе работы будут рассмотрены концепции, методы и практические примеры применения указанных подходов на реальных сигналах

ЭЭГ, что поможет углубить понимание возможностей анализа и интерпретации данных мозговой активности с использованием передовых методов обработки и классификации.

1. Методы

Электроэнцефалография (ЭЭГ) — метод исследования активности мозга, который позволяет записать электрические сигналы, генерируемые нейронами. Анализ сигналов ЭЭГ имеет большое значение в медицине, нейронауке и психологии.

Одним из наиболее эффективных методов анализа сигналов ЭЭГ является вейвлет-преобразование. Этот метод позволяет анализировать сигналы на различных временных масштабах и частотах, что полезно для выявления временных зависимостей в данных [1].

Помимо вейвлет-преобразования стохастические методы также широко используются для анализа временных рядов, включая сигналы ЭЭГ. Они позволяют учитывать случайность и изменчивость сигналов, что может быть важно при исследовании активности мозга.

Среди методов машинного обучения для анализа сигналов ЭЭГ SVM (Support Vector Machine) занимает особое место. SVM — это мощный алгоритм классификации, который может быть успешно применен для распознавания образов в сигналах ЭЭГ, например для диагностики неврологических заболеваний.

Исследования, в которых комбинируются методы вейвлет-преобразования, стохастические методы и SVM на реальных данных ЭЭГ из открытых баз данных, могут привести к новым открытиям в области нейронауки и медицины. Такие исследования направлены на улучшение диагностики и лечения различных заболеваний мозга, а также понимания особенностей его работы.

Значение использования реальных сигналов ЭЭГ из открытых баз данных. Использование реальных сигналов ЭЭГ из открытых баз данных имеет высокое значение для исследований в области нейронауки, медицины и психологии. Рассмотрим несколько ключевых аспектов этой темы.

1.1. Обзор открытых баз данных в области ЭЭГ

Существует несколько популярных открытых баз данных, содержащих записи сигналов ЭЭГ, которые широко используются исследователями по всему миру. Некоторые из таких баз данных включают:

– PhysioNet — это крупнейшая база данных с различными физиологическими сигналами, включая данные по ЭЭГ. Она содержит разнообразные наборы данных, которые могут быть использованы для различных исследований;

– EEG Database — это ресурс, предоставляющий доступ к множеству баз данных с сигналами ЭЭГ различных пациентов и здоровых испытуемых.

1.2. Преимущества использования реальных данных для исследований

Реализм. Использование реальных данных позволяет получить более точное представление об активности мозга, что помогает более эффективно и достоверно исследовать различные аспекты работы мозга.

Объективность. Данные из открытых баз обеспечивают доступ к широкому спектру различных сигналов, что помогает обеспечить объективность результатов исследования.

Возможность повторяемости. Использование открытых данных позволяет другим исследователям повторить и проверить результаты исследований.

1.3. Необходимость стандартизации и проверки качества данных

Стандартизация. Важно обеспечить единый подход к обработке и анализу данных ЭЭГ из различных баз данных, чтобы гарантировать сравнимость результатов между разными исследованиями.

Проверка качества. Необходимо проводить проверку качества данных, так как возможны искажения и шумы, которые могут влиять на выводы исследований. Она включает в себя проверку на артефакты, помехи и другие ошибки.

Использование реальных данных ЭЭГ из открытых баз данных представляет собой ценный ресурс для научных исследований в области нейронауки. Тщательный анализ и стандартизация данных играют важную роль в обеспечении достоверности и значимости исследовательских результатов.

2. Моделирование

2.1. Методы вейвлет-преобразования для анализа сигналов ЭЭГ

Вейвлет-преобразование — это метод обработки сигналов, который позволяет разложить сигнал на составляющие различных частот и временных масштабов. Он использует вейвлеты — небольшие волновые функции для анализа сигналов в диапазоне частот [2].

Преимущества применения вейвлет-анализа для обработки сигналов ЭЭГ:

- *локализация во времени и частоте*. Вейвлет-анализ позволяет одновременно анализировать и локализовать как частотные, так и временные особенности сигналов ЭЭГ;

- *лучшее разрешение*. Вейвлет-анализ обладает лучшим разрешением по сравнению с классическим преобразованием Фурье, что позволяет выявлять даже тонкие изменения в сигналах ЭЭГ;

- *мультирезольюционность*. Вейвлет-анализ обеспечивает мультирезольюционный подход к анализу сигналов, что позволяет исследовать различные временные и частотные масштабы одновременно.

Практическое применение методов вейвлет-преобразования на реальных данных ЭЭГ:

- *фильтрация шумов*. Вейвлет-преобразование позволяет эффективно фильтровать и уменьшать шумы в сигналах ЭЭГ, повышая качество данных;

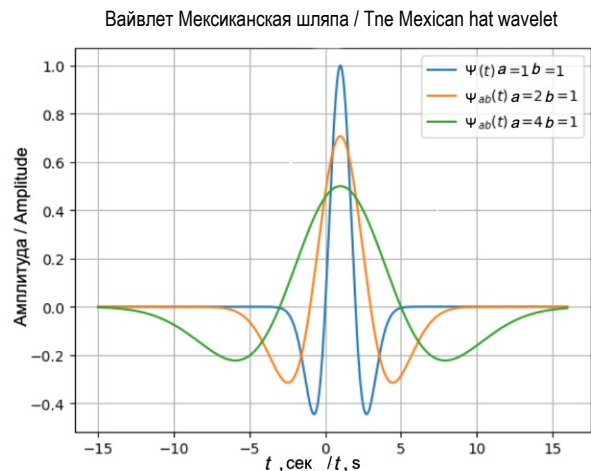
- *идентификация событий*. С помощью вейвлет-анализа можно выявлять специфические события и паттерны в сигналах ЭЭГ, такие как реакции на стимулы или эпилептические разряды;

- *изучение динамики мозговой активности*. Методы вейвлет-преобразования позволяют ана-

лизировать изменения в частотных компонентах сигнала ЭЭГ во времени, что помогает понять динамику мозговой активности.

Практическое применение вейвлет-преобразования на реальных данных ЭЭГ является мощным инструментом для изучения мозговой активности, выявления патологий и исследования когнитивных процессов [3].

Перейдем к примерам (рис.).



Пример вейвлета Мексиканская шляпа

Источники: выполнено В.В. Толмановой

An example of the "Mexican Hat" wavelet

Source: done by V.V. Tolmanova

На графике Вейвлет Мексиканская шляпа изображены три разные кривые, соответствующие математической функции, описанной в заголовке и легенде. Каждая кривая представляет собой комбинацию функций масштабирования и гауссовой функции. График имеет горизонтальную ось с метками от -15 до 15 и вертикальную ось с диапазоном значений от -0,4 до 1,0:

- 1) кривая $\psi(t)$ (синяя линия) соответствует параметрам $a = 1, b = 1$;

- 2) кривая $\psi_{ab}(t)$ (оранжевая линия) соответствует параметрам $a = 2, b = 1$;

- 3) кривая $\psi_{ab}(t)$ (зеленая линия) соответствует параметрам $a = 4, b = 1$.

Каждая из кривых представляет собой вейвлет Мексиканская шляпа для различных параметров масштабирования и сдвига, пока-

зывая, как функция меняет свою форму и ширину при изменении значений a и b .

Метод вейвлет-преобразования является мощным инструментом анализа сигналов и изображений. Используя вейвлет-преобразование, можно добиться ряда практических результатов:

1) *сжатие данных*. Вейвлет-преобразование позволяет представлять данные в их разложенном виде на различные масштабы и частоты. Это дает возможность эффективно сжимать данные, сохраняя при этом их информативность. Такой подход широко применяется в сжатии изображений и звука;

2) *фильтрация сигналов*. Вейвлет-преобразование позволяет выделять различные компоненты сигнала на разных масштабах, благодаря чему возможно удалять шумы из сигнала или выделять интересующие компоненты сигнала, улучшая его качество [4];

3) *детекция и сегментация объектов*. Вейвлет-преобразование позволяет выделять текстуры и паттерны в изображениях, что делает его полезным инструментом для детекции и сегментации объектов на изображениях;

4) *анализ временных рядов*. Вейвлет-преобразование позволяет анализировать временные ряды на различных временных и частотных масштабах, что помогает выявлять различные закономерности и тренды в данных.

Таким образом, метод вейвлет-преобразования обладает широким спектром применений и может использоваться для решения различных задач в области анализа сигналов и изображений [5].

2.2. Стохастические методы анализа сигналов ЭЭГ

Статистические методы анализа, включая стохастические методы, широко используются для изучения временных рядов ЭЭГ. Некоторые из ключевых стохастических методов включают:

– *авторегрессионные модели* — алгоритмы, моделирующие зависимости между

текущим значением сигнала и предыдущими значениями;

– *спектральный анализ* — методы анализа частотного содержания сигнала, такие как методы оценки спектра мощности;

– *методы машинного обучения* — стохастические алгоритмы, такие как скрытые марковские модели или нейронные сети, могут быть применены для анализа и классификации сигналов ЭЭГ [6].

Применение стохастических методов для изучения временных рядов ЭЭГ:

– *идентификация паттернов*. Стохастические методы позволяют выявлять и анализировать сложные временные зависимости в сигналах ЭЭГ, например переходы между различными фазами активности [6];

– *классификация состояний*. С использованием методов машинного обучения на основе временных рядов ЭЭГ можно классифицировать различные состояния мозговой активности, что полезно, например, для диагностики неврологических расстройств;

– *прогнозирование*. Стохастические методы могут быть использованы для прогнозирования будущих значений сигналов ЭЭГ на основе предыдущих данных [8].

Результаты и преимущества применения стохастических методов на реальных данных:

– *улучшенное понимание динамики мозговой активности*. Стохастические методы позволяют проводить более глубокий и точный анализ временных рядов ЭЭГ, что способствует лучшему пониманию динамики мозговой активности [9];

– *точность диагностики*. Использование стохастических методов для анализа сигналов ЭЭГ может повысить точность диагностики различных патологий мозга, таких как эпилепсия или расстройства сна;

– *поиск корреляций*. Стохастические методы позволяют исследовать корреляции между различными частотными компонентами сигналов ЭЭГ и другими параметрами, что может

привести к новым открытиям в области нейронауки [10].

Применение стохастических методов на реальных данных ЭЭГ — это эффективный подход для изучения и анализа мозговой активности, а также для диагностики и мониторинга различных неврологических состояний. Они позволяют выявлять скрытые паттерны, прогнозировать будущие изменения и улучшать общее понимание работы мозга [11].

Стохастические методы обработки данных широко применяются в различных областях. Благодаря их использованию можно достичь ряда практических результатов.

1. Улучшение скорости обучения моделей.

Стохастический градиентный спуск позволяет быстрее находить локальный оптимум функции потерь и обучать модели на больших объемах данных. Это особенно актуально в области машинного обучения и искусственного интеллекта [12].

2. Эффективное решение оптимизационных задач.

Стохастические методы оптимизации могут помочь в решении сложных оптимизационных задач, таких как задачи минимизации функций потерь или поиска оптимальных параметров модели.

3. Адаптивность к изменениям в данных.

Благодаря стохастическим методам модели могут подстраиваться к изменениям во входных данных или среде, что делает их более устойчивыми и гибкими.

4. Решение задач в реальном времени.

Использование стохастических методов позволяет обрабатывать данные в режиме реального времени, что особенно важно в таких областях, как финансы, медицина, маркетинг и др.

5. Улучшение качества результата.

Правильный выбор стохастического метода обработки данных и настройка его параметров могут повысить качество моделей и точность предсказаний [13].

Таким образом, стохастические методы обработки данных могут привести к улучше-

нию эффективности обучения моделей, адаптивности к изменениям и повышению качества результатов в различных областях прикладной науки и технологий.

3. Применение метода опорных векторов (SVM) в анализе сигналов ЭЭГ

3.1. Введение в метод опорных векторов (SVM)

Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) — это мощный алгоритм машинного обучения, который используется для задач классификации и регрессии. Основная идея SVM заключается в поиске оптимальной разделяющей гиперплоскости, которая наилучшим образом разделяет данные разных классов. SVM стремится максимизировать расстояние между этой гиперплоскостью и ближайшими к ней точками, называемыми опорными векторами [14].

3.2. Применение SVM для классификации сигналов в ЭЭГ

Применение SVM для классификации сигналов в ЭЭГ является одним из популярных подходов, особенно в задачах диагностики неврологических состояний. Для этого данные сигналов ЭЭГ обычно представляются как набор признаков, например, частотно-временные характеристики сигнала, которые затем подаются на вход SVM для обучения модели классификации [15].

3.3. Практический пример применения SVM на реальных данных ЭЭГ

Имея набор данных ЭЭГ, содержащий информацию о различных состояниях мозговой активности, мы используем SVM для классификации этих состояний. Для этого мы должны сделать следующее:

1) *предобработать данные*. Предварительная обработка сигналов ЭЭГ, такая как фильтрация, уменьшение шума и извлечение признаков.

2) *разделить данные*. Разделение данных на обучающую и тестовую выборки для обучения и оценки модели SVM;

3) *выбрать ядро*. Выбор оптимального ядра SVM, которое наилучшим образом будет соответствовать структуре данных;

4) *обучить модель*. Обучение SVM на обучающем наборе данных с последующей кросс-валидацией для подбора гиперпараметров;

5) *оценить модель*. Оценка качества модели на тестовой выборке с использованием метрик, таких как точность, полнота, F1-мера и т.д.

4. Результаты и обсуждения

В результате после обработки данных и обучения модели SVM на наборе данных ЭЭГ мы можем использовать обученную модель для классификации новых сигналов и определения состояний мозговой активности с высокой точностью [16].

Метод опорных векторов (SVM) является мощным инструментом машинного обучения, который позволяет эффективно решать задачи классификации и регрессии [17]. Далее приведем несколько практических результатов, которые можно получить при использовании SVM.

1. *Хорошая обобщающая способность*. SVM способен строить разделяющую гиперплоскость, которая максимально разделяет классы, что позволяет модели обобщать данные и делать точные прогнозы на новых, ранее не использованных данных.

2. *Решение задач с линейной и нелинейной зависимостью*. SVM способен работать как с линейно разделимыми данными, так и с данными, которые не могут быть разделены прямой линией. С помощью ядерных функций SVM может строить сложные нелинейные разделяющие поверхности.

3. *Поддержка многомерных данных*. SVM может обрабатывать данные в высокоразмерных пространствах, что позволяет эффек-

тивно работать с данными большой размерности, например в компьютерном зрении или обработке естественного языка.

4. *Решение проблемы переобучения*. SVM имеет возможность контролировать сложность модели с помощью параметров регуляризации, что помогает предотвращать переобучение и повышает обобщающую способность модели.

5. *Поддержка различных функций потерь*. SVM можно настраивать с различными функциями потерь в зависимости от задачи, что делает данный метод универсальным инструментом для различных типов задач машинного обучения [18].

Таким образом, использование метода опорных векторов может привести к высокой точности моделей, способности работать с разнообразными данными и решать различные задачи классификации и регрессии.

Поэтому SVM является мощным инструментом для классификации сигналов ЭЭГ и может быть эффективно применен для анализа и диагностики неврологических состояний [19].

Результат:

Mounted at /content/drive

Точность модели SVM на тестовом наборе данных: 0.55

Данный результат означает, что точность модели SVM на тестовом наборе данных составляет 55 %. То есть модель правильно классифицировала 55 % примеров из тестового набора данных. Чем выше точность модели, тем лучше она справляется с задачей классификации [20].

Заключение

Подводя итог, необходимо подчеркнуть значимость и перспективность данных методов для анализа мозговой активности.

Использование вейвлет-преобразования предоставляет возможность эффективного выявления частотных особенностей сигналов на

разных временных масштабах, что важно для изучения динамики мозговой активности. Стратегии стохастических методов и SVM позволяют классифицировать ЭЭГ-сигналы, что важно для диагностики патологий и понимания функциональной организации мозга.

Результаты исследования на реальных данных ЭЭГ подтверждают эффективность и применимость указанных методов для анализа сложных сигналов мозговой активности. Применение современных алгоритмов обработки данных улучшает точность классификации электрофизиологических данных, что открывает новые возможности для исследований в области нейронауки и медицинской диагностики.

Однако для дальнейшего развития и улучшения эффективности применения данных методов необходимо проводить более глубокие исследования, внедрять новейшие техники анализа данных и продолжать работу над оптимизацией алгоритмов. Кроме того, важно осуществлять сравнительный анализ с другими методами обработки сигналов для получения более точной и всесторонней оценки их применимости и эффективности.

Список литературы / References

1. Petrosian A, Prokhorov D, Homan R. Recurrent neural network based prediction of epileptic seizures in intra- and extracranial EEG. *Neurocomputing*. 2000;30(1): 201–218. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(99\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(99)00126-5)
2. Adeli H, Zhou Z, Dadmehr N. Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform. *Journal of Neuroscience Methods*. 2003;123(1):69–87. [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(02\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(02)00340-0)
3. Albaqami H, Hassan G, Datta A. Automatic detection of abnormal EEG signals using wavelet feature extraction and gradient boosting decision tree. *Biomedical Signal Processing and Control*. 70, 2021;70(2):102957. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102957>
4. Nacpil E, Wang Z, Guan M. EEG-based Emergency Braking Prediction Using Data Ablation and SVM Classification. *IEEE Sensors Journal*. 2023;23(14):16013–16019. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3283447>
5. Shanmugadass V, Suresh GR, Balakumaran T, Wise A. EEG Signal Analysis for Automated Epilepsy

Seizure Detection Using Wavelet Transform and Artificial Neural Network. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*. 2019;9(6):1301–1306. <https://doi.org/10.1166/jmhi.2019.2713>

6. Ullah I, Hussain M. An Automated System for Epilepsy Detection using EEG Brain Signals based on Deep Learning Approach. *Expert systems with applications*. 2018;107:61–71. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.021>

7. Karpov OE, Andrikov DA, Maksimenko VA, Hramov AE. Explainable artificial intelligence for medicine. *Medical doctor and information technology*. 2022;(2):4–11. (In Russ.) https://doi.org/10.25881/18110193_2022_2_4

Карпов О.Э., Андриков Д.А., Максименко В.А., Храмов А.Е. Прозрачный искусственный интеллект для медицины // Врач и информационные технологии. 2022. № 2. С. 4–11. https://doi.org/10.25881/18110193_2022_2_4

8. Sharova DE, Mikhailova AA, Gusev AV, Garbuk SV, Vladzimirskyy AV, Vasilev YA. An analysis of global experience in regulations on the use of medical data for artificial intelligence systems development based on machine learning. *Medical doctor and information technology*. 2022;(4):28–39. (In Russ.) https://doi.org/10.25881/18110193_2022_4_28

Шарова Д.Е., Михайлова А.А., Гусев А.В., Гарбук С.В., Владзимирский А.В., Васильев Ю.А. Анализ мирового опыта в регулировании использования медицинских данных для целей создания систем искусственного интеллекта на основе машинного обучения // Врач и информационные технологии. 2022. № 4. С. 28–39. https://doi.org/10.25881/18110193_2022_4_28

9. Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. *Machine learning*. 1995;20(3):273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>

10. Stam CJ. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field. *Clinical Neurophysiology*. 2004;116(10):2266–2301. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.06.011>

11. Thakor NV, Tong S. Advances in quantitative electroencephalogram analysis methods. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2004;6(1):453–95. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.5.040202.121601>

12. Hramov AE, Koronovskii A, Makarov VA, Pavlov A, Sitnikova E. *Wavelets in neuroscience*. Springer Berlin Heidelberg; 2015. ISBN: 978-3-662-43850-3

13. Hramov AE, Koronovskii AA, Makarov VA, Pavlov AN, Sitnikova E. Automatic Diagnostics and Processing of EEG. In: *Wavelets in Neuroscience. Springer Series in Synergetics*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43850-3_7

14. Percival DB, Walden AT. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge University Press; 2000. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841040>

15. Hilarov VL. Epileptic seizures regularities, revealed from encephalograms time series by nonlinear mechanics methods. *Journal of Physics Conference Series*. 2019;1400(3): 033011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/3/033011>
16. Peker M, Sen B, Delen D. A novel method for automated diagnosis of epilepsy using complex-valued classifiers and wavelet transform. *Journal of Biomedical Informatics*. 2016;20(1):108–118. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2014.2387795>
17. Meenakshi D, Singh A, Singh A. Frequency analysis of healthy & epileptic seizure in EEG using fast fourier transform. *Int. J. Eng. Res.Gen.Sci.* 2014;2(4): 683–691. Available from: <https://oaji.net/articles/2014/786-1406216595.pdf> (accessed: 17.07.2024).
18. Sudalaimani C, Thomas TE, Sivakumaran N, Valsalam SR, Meethal SP, Sathish E. Seizure prediction using general regression neural network. *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA), Chennai, India*, 2017. p. 1–7. <https://doi.org/10.1109/TIMA.2017.8064810>
19. Savadkoobi M, Oladduni T. A machine learning approach to epileptic seizure prediction using electroencephalogram (EEG) signal. *Journal of Applied Biomedicine*. 2020;40(3): 1328–1341. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2020.07.004>
20. Devarajan K, Jyostna E, Jayasri K, Balasampath V. (2014). EEG-based epilepsy detection and prediction. *International Journal of Engineering and Technology*. 2014; 6(3):212–216. <https://doi.org/10.7763/IJET.2014.V6.698>

Сведения об авторах

Толманова Вероника Вячеславовна, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-9433-7859; e-mail: 1042210065@pfur.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

About the authors

Veronika V. Tolmanova, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9433-7859; e-mail: 1042210065@pfur.ru

Denis A. Andrikov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-86-93

EDN: KTPDUU

Научная статья / Research article

Разработка математической модели для построения биоискусственной печени

А.С. Ганьшин^{ORCID}, Д.А. Андриков^{ORCID}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ andrikov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 августа 2024 г.

Доработана: 12 ноября 2024 г.

Принята к публикации: 23 ноября 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Исследование направлено на построение математической модели, отражающей основные биохимические и физиологические процессы, происходящие в биоискусственной печени. Основная цель исследования — создание надежного инструмента для предсказания поведения клеток печени в искусственных условиях, что позволит улучшить понимание их функциональности и метаболической активности. Уделено внимание моделированию уровня метаболитов, диффузии токсинов и синтеза белков. Для реализации данной задачи разработана система дифференциальных уравнений, которая описывает динамику ключевых процессов, связанных с функционированием клеток печени в искусственных условиях. Модель учитывает взаимодействие биохимических процессов, таких как метаболизм питательных веществ, секреция метаболитов, а также механизмы вывода токсинов из клеток, что является критически важным для понимания общего состояния биоискусственной печени. В ходе исследования проведен анализ влияния различных факторов на уровень метаболитов и эффективность диффузии токсинов. Это позволяет лучше понять основные механизмы, происходящие в клетках, и оптимизировать условия их культивации для повышения жизнеспособности и функциональности биоискусственной печени. Разработанная модель может стать основой для дальнейших исследований в области биотехнологий и создания высокоэффективных заменителей органов, что открывает новые перспективы в лечении печеночной недостаточности и трансплантации. Таким образом, результаты данной работы подчеркивают значимость математического моделирования в исследовании сложных биологических систем и могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов лечения заболеваний печени и разработки новых подходов в области регенеративной медицины.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, биореактор, моделирование биохимических процессов, робастная система, метаболизм печени

Вклад авторов:

Ганьшин А.С. — участие в разработке программ и их реализации, написание и доработка текста; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии.

Для цитирования:

Ганьшин А.С., Андриков Д.А. Разработка математической модели для построения биоискусственной печени // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 86–93. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-86-93>

© Ганьшин А.С., Андриков Д.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Development of a Mathematical Model for the Design of a Bio-Artificial Liver

Alexey S. Ganshin^{id}, Denis A. Andrikov^{id}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ andrikov-da@rudn.ru

Article history

Received: August 12, 2024

Revised: November 12, 2024

Accepted: November 23, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The research is aimed at developing a mathematical model reflecting the basic biochemical and physiological processes occurring in a bio-artificial liver. The main goal of the study is to create a reliable tool for predicting the behavior of liver cells under artificial conditions, which will improve the understanding of their functionality and metabolic activity. The focus of this study is the modelling of metabolites, the diffusion of toxins and protein synthesis. To achieve this goal, a system of differential equations has been developed that describes the dynamics of key processes related to the functioning of liver cells under artificial conditions. The model takes into account the interaction of biochemical processes such as nutrient metabolism, metabolite secretion, and mechanisms for removing toxins from cells, which is critically important for understanding the general condition of a bio-artificial liver. The study analyzed the influence of various factors on the level of metabolites and the effectiveness of toxin diffusion. This allows us to better understand the basic mechanisms occurring in cells and optimize the conditions of their cultivation to increase the viability and functionality of the bio-artificial liver. The developed model can become the basis for further research in the field of biotechnology and the creation of highly effective organ substitutes, which opens up new prospects in the treatment of liver failure and transplantation. Thus, the results of this work emphasize the importance of mathematical modeling in the study of complex biological systems and can be used to further improve methods of treating liver diseases and develop new approaches in the field of regenerative medicine.

Keywords: differential equation, bioreactor, modeling of biochemical processes, robust system, liver metabolism

Authors' contribution:

Ganshin A.S. — the development of programs and their implementation; writing and revision of the text; Andrikov D.A. — scientific management; research concept; methodology development.

For citation:

Ganshin AS, Andrikov DA. Development of a mathematical model for the design of a bio-artificial liver. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):86–93. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-86-93>

Введение

Биоискусственные органы представляют собой важную область современной медицины. Исследования в этой области направлены на разработку технологий, способных помочь пациентам с острой и хронической недостаточностью функций органов. Одним из ключевых направлений является разработка биоискусственной печени — устройства, способного выполнять основные функции естественной печени, такие как обработка токсинов, синтез белков и участие в метаболических процессах.

Проблема нехватки донорской печени является важной и серьезной в медицине. Во мно-

гих странах такой дефицит приводит к длительному ожиданию пациентов, что увеличивает риск осложнений и смертности. Около 10–15 % пациентов, находящихся в очереди на трансплантацию печени, умирают до получения необходимого органа. Несбалансированное соотношение между количеством нуждающихся в трансплантации пациентов и доступными донорскими органами подчеркивает важность поиска новых методов решения проблемы [1].

Построение математической модели для биоискусственной печени играет важную роль в исследованиях в этой области. Математические модели позволяют ученым и инженерам

более глубоко понять основные процессы, происходящие в биоискусственной печени, и оптимизировать их работу [2].

Данная работа направлена на построение математической модели, отражающей основные биохимические и физиологические процессы, происходящие в биоискусственной печени, включая в себя моделирование уровня метаболитов, диффузии токсинов и синтеза белков [3].

Литературный обзор подкрепляет актуальность данной темы и освещает предыдущие исследования в области математического моделирования биоискусственной печени. Исследование включает в себя разработку математических уравнений, их валидацию и разработку методов численного моделирования. Полученные результаты будут иметь потенциал для применения в медицинской практике и могут привести к улучшению технологий создания биоискусственных органов [4].

1. Методы и материалы

1.1. Метод создания биоискусственной печени

Биоискусственная печень — это относительно новое направление биотехнологии, преследующее цель создания функционирующего органа, который бы мог заменить или поддерживать работу собственной печени человека. Это поле исследований стоит во главе прорывов в области лечения заболеваний печени [5].

Создание биоискусственной печени является сложной задачей из-за множества функций, выполняемых печенью, включая очищение крови от токсинов, синтезирование белков и регулирование обмена веществ. Видение предполагаемых сложностей и способов их преодоления дает возможность создания реалистичной рабочей модели, которую можно использовать для поддержки или восстановления функций печени у пациентов [6].

Способы создания биоискусственной печени:

1) *использование стволовых клеток*. Один из подходов к созданию биоискусственной печени — это использование стволовых клеток.

Эти клетки способны дифференцироваться в любые типы клеток в организме, включая клетки печени. Ученые могут взять стволовые клетки из тканей пациента или донора, взрастить их в лаборатории и специально стимулировать дифференциацию в гепатоциты, основные функциональные клетки печени;

2) *тканевый инжиниринг*. Другой подход заключается в использовании техники тканевого инжиниринга для создания функционального аналога печени. Он включает склеивание клеток печени (гепатоцитов) в определенных пропорциях и структурах с использованием биосовместимых материалов, чтобы имитировать естественную архитектуру печени;

3) *3D-печать*. 3D-печать органов стала реальностью благодаря последним достижениям в области биопечати. Рабочее пространство 3D-принтера, как правило, наполняется гелем, содержащим стволовые клетки или гепатоциты, и затем принтер строит трехмерный объект, точно высаживая клетки по указанным координатам;

4) *использование перфузии печени*. Еще одним подходом может быть использование перфузии печени — техники, при которой кровь или раствор прокачиваются через печень или ее часть, что позволяет поддерживать жизнеспособность органа и стимулировать его функционирование в условиях искусственной среды.

Каждый из этих подходов имеет свои собственные вызовы и лимиты. Но благодаря их сочетанию ученые надеются сделать прорыв в создании биоискусственной печени, которая могла бы быть использована в клинической практике для лечения пациентов с заболеваниями печени, связанными с дефицитом функции этого органа. Современные технологии и исследования уже позволяют смотреть на это с оптимизмом [7].

1.2. Конструкция биореактора

Биореакторы играют ключевую роль во многих областях науки и технологии, включая биологию, химию и биотехнологии. Они используются для воспроизведения натуральных биологических процессов в контролируемой

среде для получения конкретных продуктов. Биореакторы могут использоваться в процессах ферментации, культивирования клеток, биотехнологии и многих других сферах [8].

Структура биореактора. Общая структура биореактора, как правило, включает следующие основные компоненты:

1. *Резервуар* — это основная часть биореактора, в котором происходит биологический процесс. Размер и форма резервуара могут изменяться в зависимости от конкретных потребностей. Резервуары могут быть изготовлены из стали, стекла или специальных пластиков, которые устойчивы к коррозии и воздействию биологически активных веществ.

2. *Смеситель*. Для эффективного прохождения биологических процессов важно обеспечить однородность среды внутри резервуара, поэтому в конструкции биореактора используется система для перемешивания, которая также способствует переносу веществ и тепла.

3. *Система подачи воздуха*. Подача воздуха или других газов важна для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов и клеток в биореакторе. Она может регулироваться в зависимости от требований к кислороду и pH среды.

4. *Температурный регулятор*. Поддержание оптимальной температуры очень важно для эффективного ведения биологических процессов.

5. *Система контроля*. Современные биореакторы оснащены автоматическими системами контроля, которые мониторят и регулируют такие параметры, как температура, давление, скорость перемешивания и pH [9].

1.3. Типы биореакторов

Существует множество типов биореакторов, каждый из которых имеет свою специфическую конструкцию в зависимости от конкретных задач.

Степлерные биореакторы — это самые простые биореакторы, в которых культура микроорганизмов выращивается в батч-режиме.

Федбатч-биореакторы. Они представляют собой модификацию батч-реакторов, в которых

подается дополнительная питательная среда для поддержания биологического процесса.

Континуальные биореакторы. В этих биореакторах процесс продолжается без перерыва, при этом питательная среда постоянно подается, а продукция постоянно удаляется.

Мембранные биореакторы. Эти биореакторы используют мембраны для сепарации клеток от питательной среды или продуктов [10].

Однако независимо от типа биореактора, его конструкция должна обеспечивать простоту в использовании, легкость в обслуживании и возможность масштабирования для коммерческого использования. Создание оптимальной конструкции биореактора требует тщательного планирования и проектирования [11].

1.4. Способы построения модели

1. *Моделирование биохимических процессов*. Использование уравнений, описывающих основные биохимические реакции, происходящие в печени. Это может включать моделирование метаболитов, синтез белков, обмен веществ и т. д. [12].

2. *Моделирование переноса массы и тепла*. Разработка математических уравнений, учитывающих перенос токсинов, метаболитов и других веществ через биоискусственную печень, а также равновесие тепла в системе.

3. *Моделирование динамики клеток и тканей*. Учет процессов, происходящих на микроуровне, включая взаимодействие клеток, диффузию веществ и рост тканей.

4. *Инженерные модели*. Разработка моделей, основанных на инженерных принципах, таких как гидравлика, термодинамика и механика материалов, для описания работы биоискусственной печени.

2. Моделирование

2.1. Построение математической модели

Биосовместимые устройства искусственной печени (БИП) работают на стыке медицинских и инженерных дисциплин, и их функционирование включает в себя использование ряда

алгоритмов для обеспечения эффективной обработки крови и поддержания гомеостаза в организме. Робастная система алгоритмов функционирования БИП должна удовлетворять различным требованиям, учитывая индивидуальные особенности пациентов и динамические изменения их состояния [13].

Такая система алгоритмов функционирования БИП может включать алгоритмы для диагностики дефектов устройства, обнаружения аномальных ситуаций, а также алгоритмы, обеспечивающие безопасное прекращение работы в случае возникновения серьезных проблем [14].

Методы и приемы контроля и коррекции работы БИП, включая адаптивные алгоритмы, могут обеспечить эффективную и безопасную работу устройства в различных клинических ситуациях.

Таким образом, робастная система алгоритмов функционирования БИП включает в себя широкий спектр методов, алгоритмов и протоколов, направленных на обеспечение надежной и безопасной работы искусственной печени в различных клинических условиях [15].

Основные параметры:

1. Коэффициент диффузии (D) — определяет интенсивность диффузии вещества в клетках печени.

2. Размер области (L) — размер пространственной области, в которой моделируется процесс.

3. Время моделирования (T) — общее время моделирования процесса.

4. Количество функционирующих клеток печени ($cells$) — количество клеток печени в начальном состоянии.

5. Уровень сахара в крови ($sugarLevel$) — концентрация сахара в крови.

6. Скорость потока крови ($bloodFlow$) — скорость потока крови, проходящего через печень.

7. Масса печени ($liverMass$).

8. Скорость метаболизма ($metabolismRate$) — скорость метаболизма клеток печени.

Эти параметры влияют на характеристики и динамику моделируемого процесса в системе биоискусственной печени [16].

Приведенный код (Приложение) представляет собой математическую модель для построения биоискусственной печени. В данной модели используются различные параметры, такие как коэффициент диффузии, размер области, время моделирования, количество функционирующих клеток печени, уровень сахара в крови, скорость потока крови, масса печени и скорость метаболизма. Как результат, система должна быть устойчива к помехам [17].

Сначала в коде задаются параметры модели, такие как коэффициент диффузии (D), размер области (L), время моделирования (T), количество функционирующих клеток печени ($cells$), уровень сахара в крови ($sugarLevel$), скорость потока крови ($bloodFlow$), масса печени ($liverMass$) и скорость метаболизма ($metabolismRate$).

Затем определяются параметры дискретизации (nx — количество узлов по пространственной сетке, nt — количество временных шагов), а также рассчитываются шаги по времени и пространству (dx , dt) [18].

После инициализируется начальное состояние системы — концентрация клеток в каждом узле пространственной сетки.

В цикле времени происходит расчет изменения концентрации клеток с использованием уравнения диффузии. На каждом временном шаге происходит обновление состояния каждой клетки на основе диффузии, потока крови и метаболизма. При этом учитываются влияние соседних клеток, скорость кровотока и метаболизма в каждом узле пространственной сетки.

После расчета изменения концентрации клеток в каждом узле пространственной сетки происходит обновление текущего состояния системы, а итерация по времени продолжается до достижения заданного времени моделирования [19].

График (рис. Результат моделирования) показывает, как со временем клетки печени, изначально сконцентрированные в центре области, диффундируют, и как их концентрация изменяется из-за влияния кровотока и метаболизма.

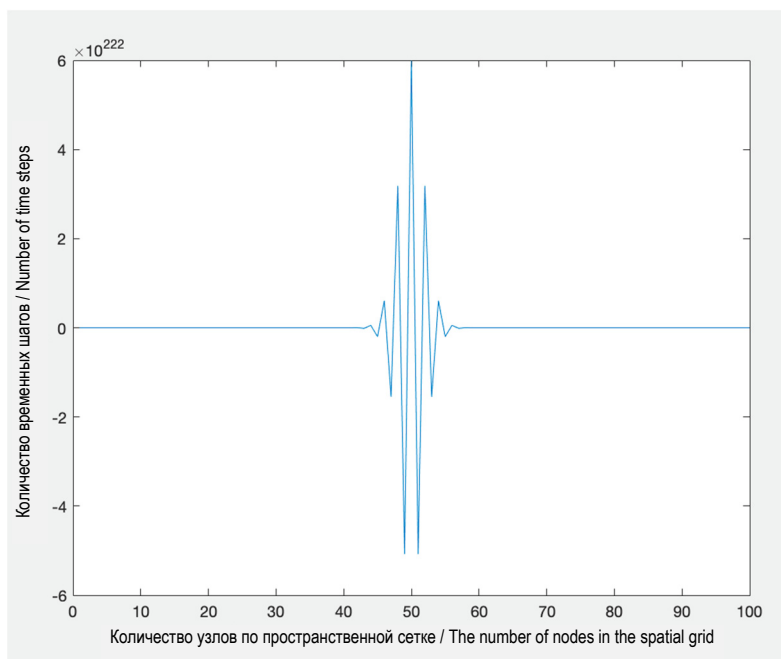
В каждый момент времени можно наблюдать, как пик концентрации в центре умень-

шается и ширится, в то время как концентрация клеток в других узлах области увеличивается.

Таким образом, данный код позволяет моделировать процессы диффузии клеток печени с учетом влияния кровотока и метаболизма на изменение их концентрации в пространстве в течение определенного временного интервала.

Конечная цель этой модели связана с изучением влияния различных параметров, таких как скорость кровотока или уровень метаболизма,

на распространение клеток печени. Такие модели могут быть полезны как для понимания физиологических процессов, так и разработки методов лечения и медикаментов, в частности для предсказания эффективности препаратов на изменение концентрации клеток. Также данные модели могут быть использованы для симуляции различных патологических состояний печени, чтобы изучать их влияние на процессы диффузии клеток и предсказывать результаты таких состояний.



Результат моделирования
Источник: выполнено А.С. Ганьшиным в программе MATLAB
The result of the simulation
Source: done by A.S.Ganshin in MATLAB software

Кроме того, дополнительные возможности могут включать в себя учет изменений в структуре печени, например, при заболеваниях, а также моделирование воздействия различных лекарственных препаратов на эти процессы. Интеграция таких моделей с экспериментальными данными может помочь улучшить наше понимание биологических процессов и разработать более эффективные подходы к лечению печени и других заболеваний.

Таким образом, данный код может служить основой для различных исследований в

области биологии, медицины и фармакологии и имеет потенциал для разработки новых методов лечения и понимания физиологических процессов в организме [20].

Заключение

Конструирование математической модели для построения биоискусственной печени представляет собой сложную и многоаспектную задачу. Оно включает в себя учет различных процессов, происходящих на различных

уровнях: от клеточного и тканевого до биохимического и инженерного.

Проведение моделирования биохимических процессов необходимо для описания основных метаболических реакций и понимания работы печени на молекулярном уровне. Моделирование переноса массы и тепла играет ключевую роль в понимании как транспортировки веществ, так и общей термодинамики системы. Моделирование динамики клеток и тканей необходимо для изучения роста и взаимодействия тканей на микроуровне.

Однако использование каждого из этих подходов по отдельности может быть недостаточно для полного понимания работы биоискусственной печени. Именно поэтому ученые часто прибегают к комбинированным подходам, которые совмещают различные методики математического моделирования, чтобы создать более совершенные и сложные модели, охватывающие разные аспекты функционирования биоискусственной печени.

Таким образом, математическое моделирование является неотъемлемым элементом разработки новых технологий в области создания биоискусственных органов и обеспечивает жизненно важное понимание сложных взаимосвязей и процессов, происходящих в биоискусственной печени.

Приложение

Параметры моделирования

```
% Параметры
D = 1e-6; % Коэффициент диффузии
L = 1; % Размер области
T = 500; % Время моделирования
cells = 50; % Количество функционирующих клеток печени
sugarLevel = 5.5; % Уровень сахара в крови (ммоль/л)
bloodFlow = 30; % Скорость потока крови (мл/с)
liverMass = 1.5; % Масса печени (кг)
metabolismRate = 0.1;
% Параметры дискретизации
nx = 100; % Количество узлов по пространственной сетке
nt = 500; % Количество временных шагов
% Расчет шагов по времени и пространству
dx = L/nx;
dt = T/nt;
% Начальное состояние
c = zeros(nx,1); % концентрация
c(round(nx/2)) = cells; % Количество здоровых клеток в середине области
```

```
% Шаблон для цикла времени
for t = 1:nt
% Скопируем текущее состояние во временную переменную
c_old = c;
% Обновляем состояние каждой клетки на основе диффузии и потока крови
for i = 2:nx-1
dc = D * dt/dx^2 * (c_old(i+1) - 2*c_old(i) + c_old(i-1));
bloodFlowEffect = bloodFlow / liverMass / sugarLevel;
metabolismEffect = metabolismRate * dt;
c(i) = c_old(i) + dc - dt * bloodFlowEffect * c_old(i) - metabolismEffect * c_old(i);
end
% Анимировать процесс
if mod(t,10) == 0
plot(c);
pause(0.1);
end
end
xlabel('Количество узлов по пространственной сетке');
ylabel('Количество временных шагов');
```

Список литературы / References

1. Karvellas CJ, Subramanian RM. Current Evidence for Extracorporeal Liver Support Systems in Acute Liver Failure and Acute-on-Chronic Liver Failure. *Critical Care Clinics*. 2016;32(3):439–451. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2016.03.003>
2. Kanjo A, Ocskay K, Gede N. Efficacy and safety of liver support devices in acute and hyperacute liver failure: A systematic review and network meta-analysis. *Sci Rep*. 2021;11:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83292-z>
3. Doyle J, Francis B, Tannenbaum A. *Feedback Control Theory*. New York: Dover Publ.; 1990. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85460-1_1
4. Koobloch HW, Isidori A, Flockerzi D. *Topics in control theory*. Basel: Springer Publ.; 1993.
5. Zhou K, Doyle J, Glover K. *Robust and Optimal Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Publ.; 1996. ISBN 0134565673, 9780134565675
6. Zhou K, Khargonekar PP. An algebraic Riccati equation approach to H^∞ optimization. *Systems & Control Letters*. 1988;11(2):85–91. [https://doi.org/10.1016/0167-6911\(88\)90080-1](https://doi.org/10.1016/0167-6911(88)90080-1)
7. Tararykin SV, Tyutikov VV. A robust model control for dynamic systems. *Automation and Remote Control*. 2002; 63(5):730–742. <https://doi.org/10.1023/A:1015489719323>
8. Wo SL, Shi G, Zou Y. Robust H-infinity control for discrete-time singular systems with time-delay and non-linear perturbation. *Systems Engineering and Electronics*. 2009;31:916–921.
9. Xu S, Lam J, Yang C. Robust H^∞ control for discrete singular systems with state delay and parameter uncertainty. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*. 2002;9:539–554.

10. Kolpakov F, Akberdin I, Kashapov T, Kiselev L, Kolmykov S, Kondrakhin Y, Kutumova E, Mandrik N, Pintus S, Ryabova A, Sharipov R. BioUML: an integrated environment for systems biology and collaborative analysis of biomedical data. *Nucleic acids research*. 2019;2;47(W1): 225–233.
11. Nakao M, Nakayama N, Uchida Y. Nationwide survey for acute liver failure and late-onset hepatic failure in Japan. *J. Gastroenterol*. 2017;53(20):752–769. <https://doi.org/10.1007/s00535-017-1394-2>
12. Court FG, Wemyss-Holden SA, Dennison AR, Maddern GJ. Bioartificial liver support devices: Historical perspectives. *ANZ Journal of Surgery*. 2003;73(9):739–748. <https://doi.org/10.1046/j.1445-2197.2003.02741.x>
13. Alves LA, Bonavita A, Quaresma K, Torres E. New Strategies for Acute Liver Failure: Focus on Xenotransplantation Therapy. *Cell Medicine*. 2010;1(1):47–54. <https://doi.org/10.3727/215517910X516646>
14. Shen Y, Wang XL, Wang B, Shao JG, Liu YM, Qin Y, et al. Survival benefits with artificial liver support system for acute-on-chronic liver failure: a time series-based meta-analysis. *Medicine*. 2016;95(3):e2506. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000002506>
15. Ren S, Irudayam JI, Contreras D, Sareen D, Talavera-Adame D, Svendsen CN, Arumugaswam V. Bioartificial Liver Device Based on Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Hepatocytes. *Journal of Stem Cell Research & Therapy*. 2015;5:1000263. <https://doi.org/10.4172/2157-7633.1000263>
16. Vitale A, Salinas F. Could Sorafenib Disclose New Prospects as Bridging Therapy to Liver Transplantation in Patients with Hepatocellular Carcinoma? *Journal of Liver*. 2013;02(04). <https://doi.org/10.4172/2167-0889.1000134>
17. Koivusalo AM, Teikari T, Hockerstedt K, Iso-niemi H. Albumin dialysis has a favorable effect on amino acid profile in hepatic encephalopathy. *Metabolic Brain Disease*. 2008;23(4):387–398. <https://doi.org/10.1007/s11011-008-9110-9>
18. Mohammed Y, Verhey JF. A finite element method model to simulate laser interstitial thermo therapy in anatomical inhomogeneous regions. *BioMedical Engineering OnLine*. 2005;4:1–16. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-4-2>
19. Pitsik EN, Goremyko MV, Makarov VV, Hramov AE. Mathematical modelling of the network of professional interactions. *Izvestiya VUZ. Applied nonlinear dynamics*. 2018;26(1):21–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-1-21-32>
20. Нарусе К., Сакай Я., Нагашима Дж., Сузуки М., Мурто Т. Развитие новой биоискусственной печени, наполненной порциными гепатоцитами, иммобилизованными на не тканевом материале. *Int J Artif Organs*. 1996;19(6):347–352. PMID: 8814498

Сведения об авторах

Ганьшин Алексей Сергеевич, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

About the authors

Alexey S. Ganshin, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Denis A. Andrikov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-94-106

EDN: LACBPD

Research article / Научная статья

Influence of Environmental Temperature on the Corrosion Resistance of Various Aluminum Alloys: an Experimental Study

Kazem Reza Kashyzadeh^{ID}✉, Siamak Ghorbani^{ID}, Andrey S. Averyanov^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Article history

Received: October 17, 2024

Revised: January 12, 2025

Accepted: January 20, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. One of the biggest challenges that engineers encounter in a variety of industry sectors is corrosion. The current research focuses on the corrosion behavior of various types of aluminum alloys widely used in the industry. In this regard, aluminum alloys A12024, A16061, and A17075 were tested. Also, the effect of environmental temperature on the corrosion rate of each group of materials was investigated. Three statistical parameters, including total corroded area, corrosion rate (total corroded area to total sample area), and the maximum size of corroded point, were measured as corrosion indicators in the samples. In addition, the surface hardness of the samples was measured and presented by the Brinell method. Finally, the weakest aluminum alloy against corrosion under different temperature conditions was introduced. The corrosion test conducted in the presence of cold air produced the maximum hardness in any of the aluminum alloys (2024, 6061, and 7075) that were examined. Aluminum 7075 has the lowest corrosion resistance, while aluminum 6061 has the strongest corrosion resistance when various testing conditions are taken into account.

Keywords: aluminum alloys, corrosion rate, Optical Microscope (OM), observations, surface hardness

Authors' contribution:

Reza Kashyzadeh K. — conceptualization, methodology, software, writing; Ghorbani S. — writing, original draft preparation; Averyanov A.S. — writing, original draft preparation.

Funding

The authors received no financial support for conducting this research.

Data Availability Statement:

The datasets can be made available upon request from the corresponding author.

For citation:

Reza Kashyzadeh K, Ghorbani S, Averyanov AS. Influence of environmental temperature on the corrosion resistance of various aluminum alloys: an experimental study. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(1):94–106. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-94-106>

© Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Влияние температуры окружающей среды на коррозионную стойкость различных алюминиевых сплавов: экспериментальное исследование

К. Реза Каши Заде[✉], С. Горбани^{id}, А.С. Аверьянов^{id}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 октября 2024 г.

Доработана: 12 января 2025 г.

Принята к публикации: 20 января 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Одной из самых серьезных проблем, с которой сталкиваются инженеры в различных отраслях промышленности, является коррозия. В настоящее время основное внимание уделяется коррозионным свойствам различных типов алюминиевых сплавов, широко используемых в промышленности. В связи с этим были протестированы алюминиевые сплавы Al 2024, Al 6061 и Al 7075. Кроме того, было исследовано влияние температуры окружающей среды на скорость коррозии каждой группы материалов. В качестве индикаторов коррозии образцов были измерены три статистических параметра, включая общую площадь коррозии, скорость коррозии (отношение общей площади коррозии к общей площади образца) и максимальный размер точки коррозии. Кроме того, с помощью метода Бринелля была измерена и представлена поверхностная твердость образцов. Наконец, был представлен алюминиевый сплав, наиболее устойчивый к коррозии при различных температурных режимах. Испытание на коррозию, проведенное в присутствии холодного воздуха, показало максимальную твердость среди всех исследованных алюминиевых сплавов (2024, 6061 и 7075). Алюминий 7075 имеет самую низкую коррозионную стойкость, тогда как алюминий 6061 имеет самую высокую коррозионную стойкость, если принять во внимание различные условия испытаний.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, скорость коррозии, оптический микроскоп (ОМ), наблюдения, твердость поверхности

Вклад авторов:

Реза Каши Заде К. — разработка концепции, методология, программное обеспечение, обработка данных, написание; Горбани С. — написание, подготовка оригинального проекта; Аверьянов А.С. — написание, подготовка оригинального черновика.

Финансирование

Авторы не получали финансовой поддержки для проведения этого исследования.

Заявление о доступности данных:

Данные могут быть предоставлены по запросу соответствующего автора.

Для цитирования:

Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Averyanov A.S. Influence of environmental temperature on the corrosion resistance of various aluminum alloys: an experimental study // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 1. С. 94–106. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-94-106>

Introduction

Corrosion is one of the biggest challenges faced by engineers in various industries [1–3]. This destructive phenomenon is a physical and chemical interaction between a metal material and the environment, which leads to a change in the properties of the metal and can cause a significant disruption in the performance of the metal, the environment, or the technical system of which they are a part of [4; 5]. Owing to the presence of an oxide layer on its surface, aluminum alloys show good corrosion resistance in corrosive environments with pH values in the range of 3 to 9. However, in environments with pH values lower than 3 or higher than 9, the outer porous layer is dissolved, and the aluminum surface is severely corroded. In other words, aluminum products are quickly destroyed as a result of long-term exposure to aggressive environments, especially those containing chlorine [6; 7]. Therefore, it is very important to understand the corrosion properties of aluminum alloys in special environments and under harsh working conditions. Failures caused by corrosion in metals have caused irreparable eco-

nomic losses in large industries such as petrochemical, automotive, and aerospace, etc. [8; 9].

National Association of Corrosion Engineers (NACE), as a world leader in corrosion control, has estimated the total costs associated with global corrosion losses at 2.5 trillion dollars per year, which is equivalent to 3.4% of the world's Gross Domestic Product (GDP) [10]. According to the NACE international report, corrosion losses in the world's largest economies include 5% of GDP for Arab countries, 4.2% for China and India, 4% for Russia, 3.8% for the European Union (Norway and Switzerland), 2.7% for the United States, and 1% in the case of Japan. These statistics emphasize the importance of understanding corrosion phenomenon, as well as the development of plans that prioritize the long-term stability of materials and the use of optimal corrosion protection methods. As mentioned previously, aluminum alloys have many uses in industry. Therefore, considerable research has been conducted to investigate the destructive phenomena on aluminum. As schematically illustrated in Figure 1, a wide variety of corrosion types exist [11].

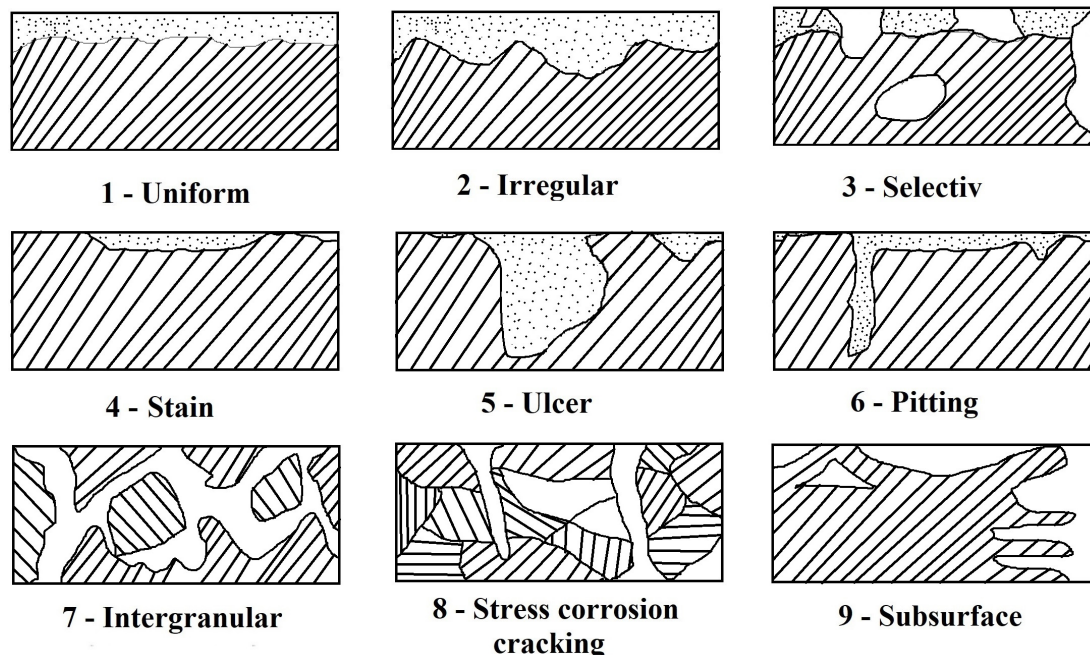


Figure 1. Schematics of different types of corrosion in aluminum alloys

Source: made by A.S. Averyanov, S. Ghorbani, K. Reza Kashyzadeh [11]

Among the corrosion mechanisms, pitting, intergranular, and exfoliation corrosion are the most prominent [12]. Moreover, exfoliation corrosion and stress corrosion are also the main types of corrosion in aircraft materials [13]. Paglia and Buchheit investigated the sensitivity of aluminum alloy friction stir welds to corrosion [14]. Because the microstructure of the material changes drastically in the Heat-Affected Zone (HAZ), intergranular corrosion occurs in this area. This corrosion becomes more severe as the grain boundary sediments become coarser. They reported that by using a short-term heat treatment after welding at a temperature similar to the welding temperature, the microstructure can be modified, and the corrosion rate can be reduced.

Xu X. et al. utilized an amorphous CrAlN coating to improve the corrosion resistance of aluminum alloy in a 3.5% NaCl solution [15]. They reported that material properties (i.e., microstructure and corrosion resistance) of the amorphous CrAlN coating depends on the nitrogen content of the coating. Sánchez-Amaya et al. studied the influence of heat treatment on the susceptibility of AA2024 and AA7075 alloys to intergranular corrosion [16]. They showed that slow quench step resulted in samples with high susceptibility to intergranular corrosion in both alloys.

Li X. et al. simulated a mechanical test in line with the corrosion behavior of 7005 aluminum alloys in atmospheric environments [17]. In other words, they believed that the stress concentration of the pits led to the destruction of the mechanical properties. Therefore, the effects of pit size and location parameters on stress concentration were analyzed using Finite Element (FE) method. Finally, they presented a Back Propagation Neural Network (BPNN) model to predict stress concentration.

As is clear from the above literature review, much research has been carried out in the field of aluminum corrosion and different methods to prevent or reduce the corrosion rate. Most research has been experimental. However, a limited number of simulation studies have been conducted. In addition, in recent years, machine-learning techniques have been used in this field. In simulation studies,

laboratory data are required to validate the model. Furthermore, using machine learning techniques, experimental data is collected, and the machine is trained. Therefore, it can be concluded that laboratory data and tests are required in any case. In addition to the above-mentioned issues, not all the details of the corrosion phenomenon can be simulated in the software, and the main reason is the simplification of the software to solve various problems. Therefore, to achieve a system response with a higher accuracy, it is necessary to perform a series of tests. Therefore, this study was performed in a laboratory. In this study, different groups of aluminum alloys were prepared and immersed in a corrosive solution with a pH of approximately 12. Finally, the solution containing the sample was placed in three different environments at different temperatures. After a specified period of time, the samples were removed from the solution and the corrosion parameters were investigated. The subsequent parts of the article are organized in such a way that the second section is dedicated to materials and methods. The third section describes the experiment, and the obtained results are discussed in the fourth section. Finally, the achievements of the current study are presented in the last section.

1. Materials and methods

1.1. Materials

The studied materials are widely used aluminum alloys in industry, including 2000, 6000, and 7000 series sheets with a thickness of 4 mm. These sheets were prepared using a casting process. Then, using a wire cutter, they were cut into pieces with a square cross-section and side size of 10 mm. Quantometric test was performed to extract the percentage of the constituent elements in the raw materials. Table 1 illustrates the chemical composition of Al 2024, Al 6061, and Al 7075. Moreover, for each group, a specific heat treatment was defined according to what is most commonly used in the industry. For example, to perform T6 heat treatment, Al 7075 samples were fully tempered by heating at 480 °C for 5 h and then quenched

in water below 120°C (slow cooling of approximately 28 °C per hour). Finally, they were kept at this temperature for 24 h [18].

Moreover, to determine the effect of heat treatment on the mechanical properties of each group of aluminum alloys, nine laboratory samples

were prepared according to the ASTM E8/E8M standard. Tensile tests were performed at room temperature under controlled environmental conditions according to ISO 17025. The obtained results, including the key parameters, are listed in Table 2.

Table 1

Chemical composition of different aluminum alloys used in the current research, wt%

Material	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Ti	Cr
Al 7075	96.68	1.15	0.32	0.01	0.73	0.99	0.01	0.01	0.10
Al 6061	97.72	0.58	0.36	0.21	0.03	0.93	0.00	0.01	0.16
Al 2024	97.57	0.64	0.14	0.27	0.12	1.00	0.01	0.03	0.22

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

Table 2

The results obtained from tensile tests

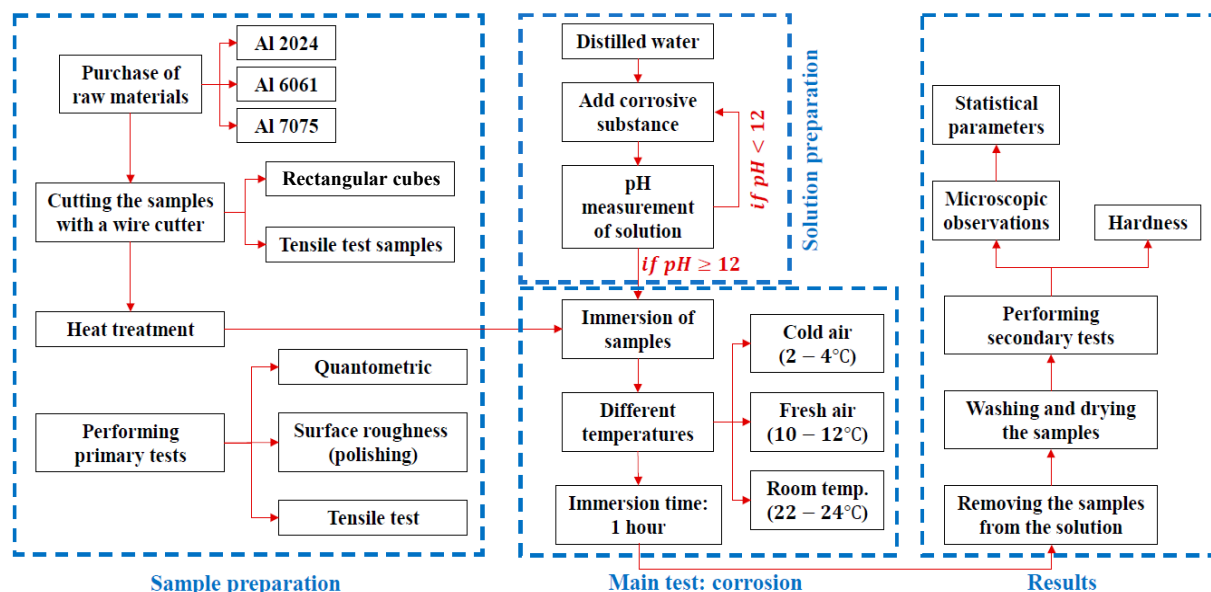
Material	Yield strength	Ultimate tensile strength
Al 2024	98 MPa	186 MPa
Al 7075-T6	483 MPa	560 MPa

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

1.2. Methods

This section describes the general idea behind conducting this research. The working algorithm is illustrated step by step in Figure 2.

This research includes two preparation steps, that is, aluminum samples and a corrosive solution with a minimum pH of 12. The tests were divided into three groups: primary, main, and secondary.

**Figure 2.** The working algorithm used in the current research

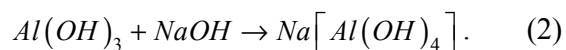
Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

In fact, primary tests are related to the tests performed before the main test, that is, corrosion, and the goal is to better understand the properties of the material. Subsequently, the main test is corrosion, which is done by immersing the samples in the corrosive solution for a certain period of time. Finally, there is a secondary test that is performed on the corroded samples to determine their corrosion rate through microscopic observations and measurement of statistical parameters. Furthermore, to determine the effect of corrosion on the properties of the raw material, hardness measurement is also done.

2. Experiments

Before performing the main test, the surfaces of the samples were polished with P800 grit sandpaper so that they had the same surface roughness. To create a corrosive solution, 20 g calcium hydroxide was added to 250 ml of distilled water (pH~6.5). In this time, the pH of the solution was measured and showed a value of 10.2. Subsequently, 20 g of sodium hydroxide was added; as a result, the pH value reached approximately 12.12. The solutions were poured into nine glass containers at the same height level and each sample was immersed in a solution container. The glass containers were placed in three different environments in terms of temperature, including 2–4 degrees called cold air, 10–12 degrees called fresh air, and 22–24 degrees called room temperature. The immersion time for all samples was considered one hour. Subsequently, the samples were removed from the solution, washed with distilled water, and their surface was dried with a heater, and finally they were not exposed to air.

The corrosion process in aluminum is based on the following reaction equations:



The surface analysis of the samples was performed using an Olympus GX53 optical microscope and the Olympus Stream program. In fact,

Optical Microscope (OM) observations were conducted to monitor surface damage characteristics such as the maximum, minimum, and average diameters of pits, pit shapes, and corrosion rate. Thus, the area of the visible sample in the observation range of the microscope was measured in square micrometers S_t . Moreover, the area of each corrosion damage was measured and displayed as S_i , where i represents the number of damages caused on the surface of the sample owing to the corrosion. Eventually, the corrosion rate was obtained as the ratio of the total area of corrosion damage on the surface to the total area $R = \sum S_i / S_t$.

In addition, the largest corrosion damage was identified on the surface, and assuming the shape of the damage to be circular or several circles connected together, the largest diameter of the damage was measured as D_{max} .

Finally, the hardness values of the samples were measured. For this purpose, a universal hardness tester METOLAB 703 was used with the ability to measure hardness based on Brinell, Rockwell, and Vickers methods. Three points were measured for each sample to verify the reproducibility of the results. The hardness test was performed based on the Brinell method with a ball (diameter of 10 mm), applying a load of 187.5 kg and a settling time of 30 s.

3. Results and Discussion

For ease of understanding, each sample was assigned a unique numeric and letter code that indicated the raw material and corrosion conditions. The four-digit number indicates the series of aluminum alloys, and the letter indicates the test conditions. In this regard, X , K , and Y represent cold air, room temperature, and fresh air, respectively. The samples after the corrosion test along with their identification codes are shown in Figure 3. It is clear that the images of the samples exposed to fresh air have a darker surface than the other samples. On the other hand, the images related to samples that are in the vicinity of cold air have a brighter surface, such as snow salt.

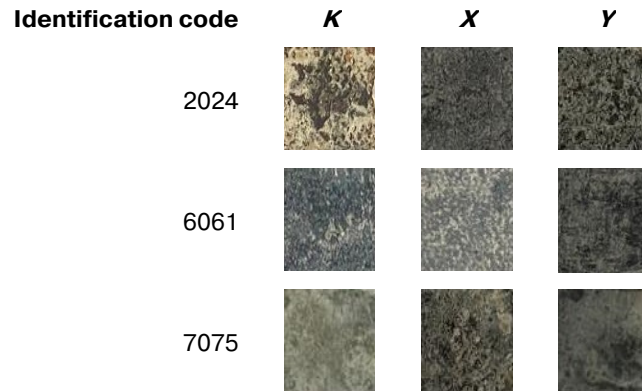


Figure 3. Samples after performing corrosion tests under different conditions

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

In addition, Figure 4 illustrates the corroded surfaces of different samples under an optical microscope at $10\times$ magnification. These images were obtained after cleaning (washing with distilled water, drying with a heater, and not being in close proximity to air). Therefore, the corroded parts can be recognized as dark holes with prominent depths [19].

OM observations showed that aluminum 7075 suffered more corrosion damage under all temperature conditions than the other two aluminum series (6xxx and 2xxx) did. Moreover, among all the samples, the sample made of the 6061 alloy showed the least corrosion effects at room temperature, which is consistent with the results presented in the laboratory study of Kharitonov et al.

[20] on the corrosion observations of the sixth series aluminum alloy.

Next, to measure the statistical parameters and compare the samples from the viewpoint of corrosion resistance, microscopic observations were performed at $100\times$ magnification. These images (Figures 5–7) are shown in detail, including the corroded areas with red lines and the largest corrosion damage in yellow. Also, the blue number indicates the largest size corresponding to the largest corrosion damage, which was extracted in micrometers using the software. In addition, the area of the corroded zones was extracted using the software and is reported in Tables 3–5. All corroded zones are indicated by numbers. Moreover, the zero number represents the total area of the examined surface.

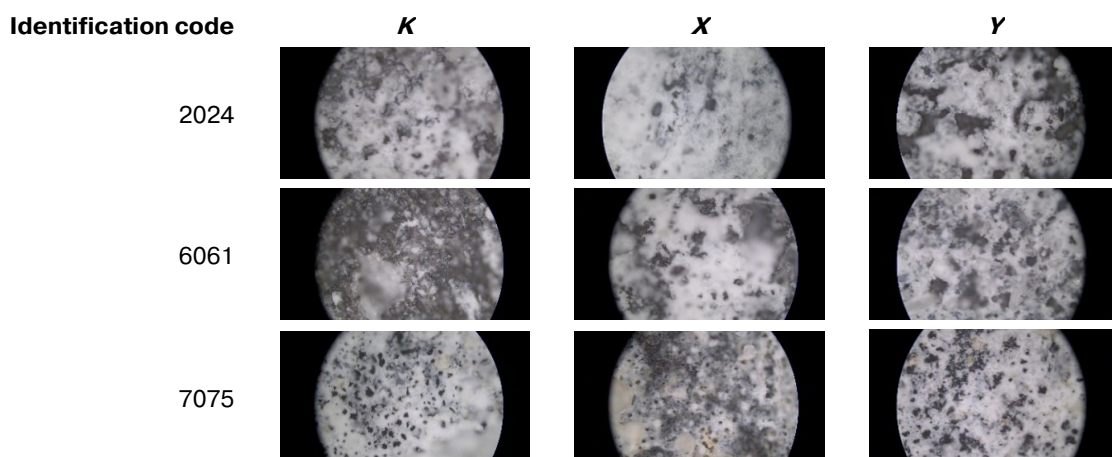


Figure 4. OM observations at $10\times$ magnification

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

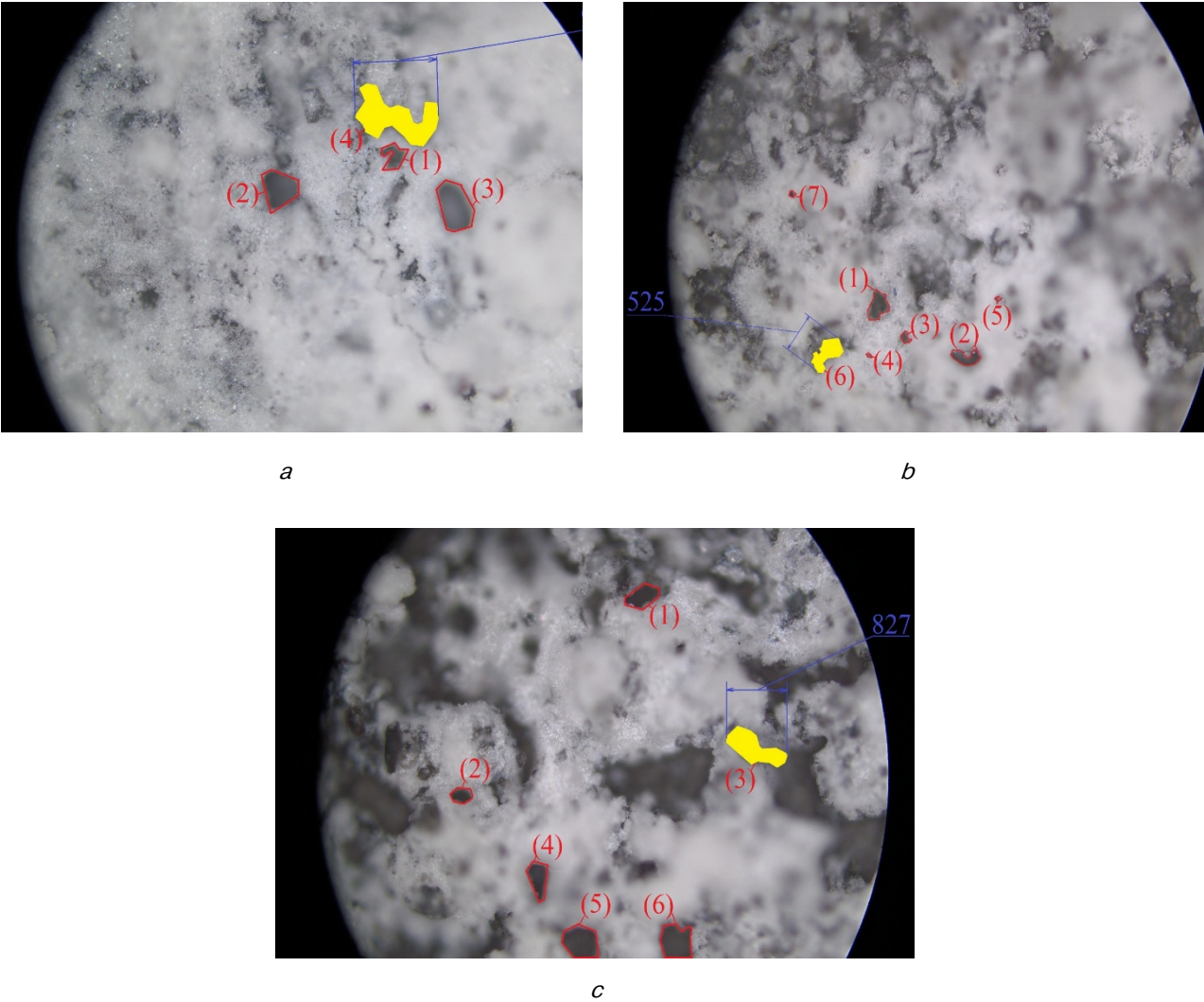


Figure 5. OM observations with 100 times magnification for Al 2024 samples at different temperature conditions including: *a* — in the vicinity of cold air; *b* — at room temperature; *c* — in the vicinity of fresh air
Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

Table 3

Statistical characteristics (area in $\times 10^3 \mu m^2$) corresponding to Figure 5

Zone No.	0	1	2	3	4	5	6	7
Part (a)	73913	81.4	180.5	190.8	386	–	–	–
Part (b)	74404	54	32	11	5	6	104	7
Part (c)	74695	108	47	333	113	248	265	–

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

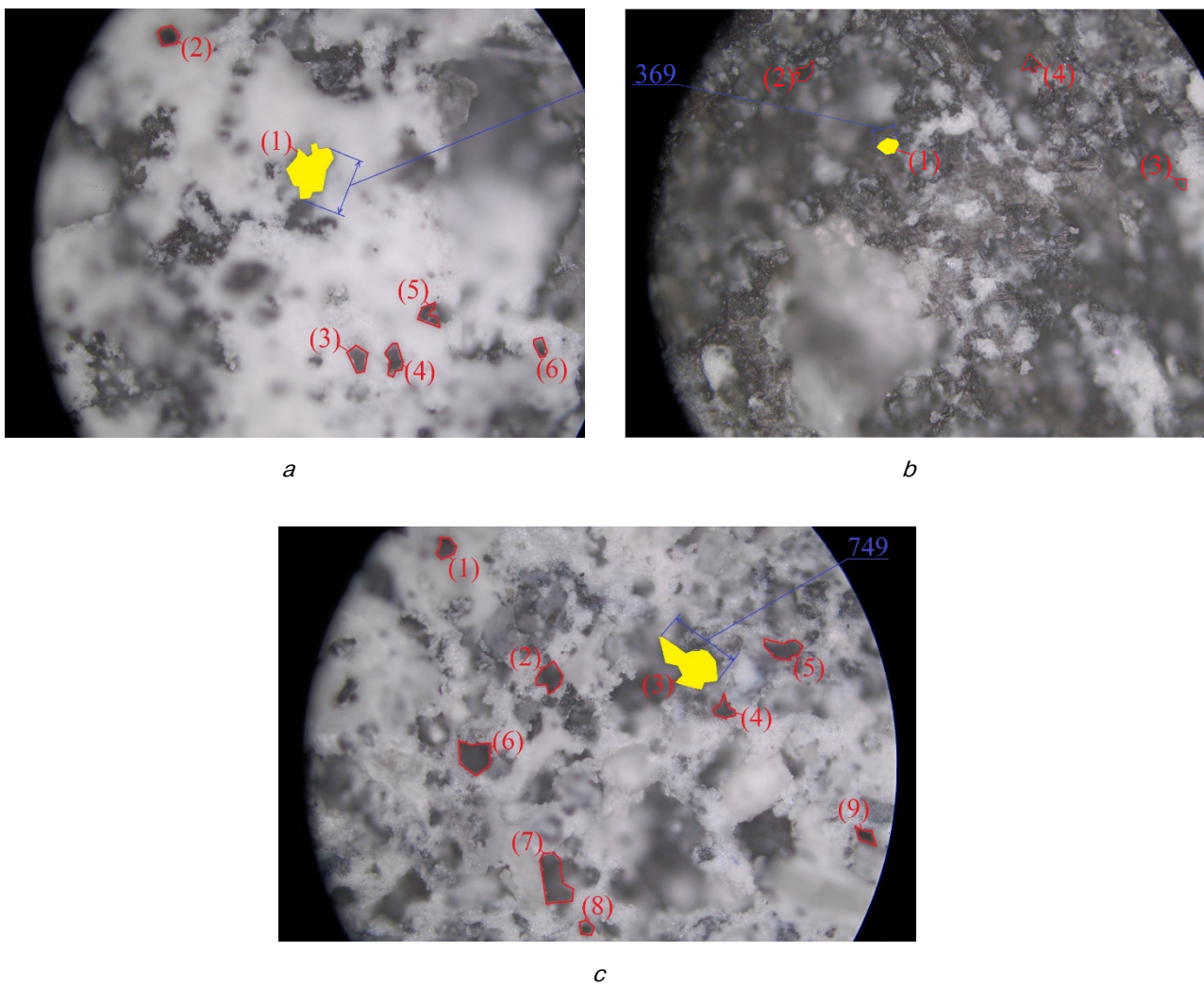


Figure 6. OM observations with 100 times magnification for Al 6061 samples at different temperature conditions including:
a — in the vicinity of cold air; *b* — at room temperature; *c* — in the vicinity of fresh air
Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

Table 4

Statistical characteristics (area in $\times 10^3 \mu m^2$) corresponding to Figure 6

Zone No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Part (a)	72766	234	106	121	119	114	102	–	–	–
Part (b)	74131	67	63	50	43	–	–	–	–	–
Part (c)	74237	86	104	306	71	106	145	232	52	54

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

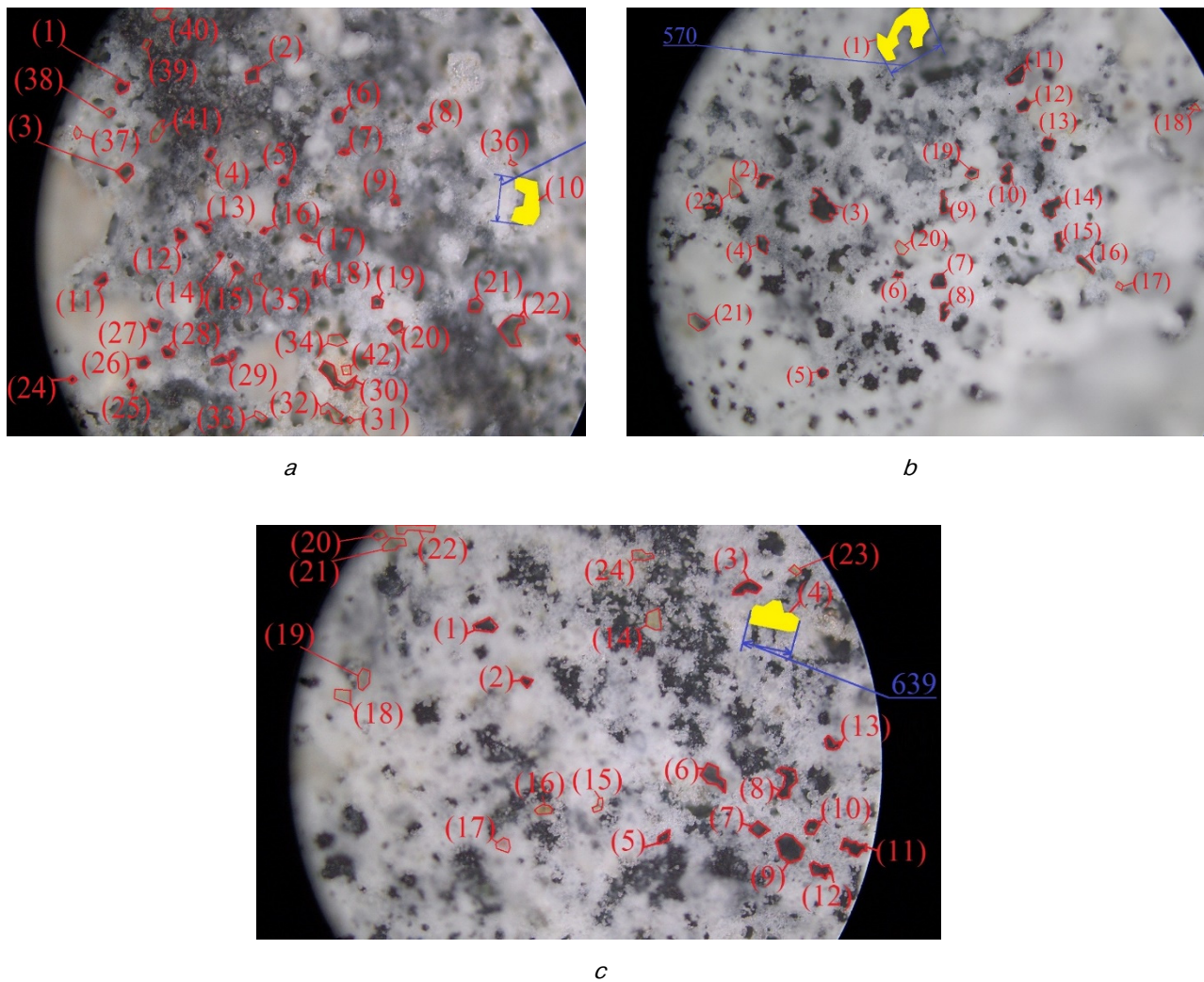


Figure 7. OM observations with 100 times magnification for Al 7075 samples at different temperature conditions including:
a — in the vicinity of cold air; b — at room temperature; c — in the vicinity of fresh air
Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

Table 5

Statistical characteristics(area in $\times 10^3 \mu m^2$) corresponding to Figure 7

Part (a)	Zone No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Area	74208	20	24	33	17	15	27	10	17
	Zone No.	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Area	14	191	21	20	20	8	19	10	10
	Zone No.	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	Area	17	20	25	26	166	17	8	9	23
	Zone No.	27	28	29	30	31	32	33	34	35
	Area	23	23	54	151	10	116	36	91	20
	Zone No.	36	37	38	39	40	41	42	43	44
	Area	16	22	24	22	90	103	18	–	–

Ending of the Table 5

Part (b)	Zone No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Area	74419	232	41	157	42	32	28	55	30
	Zone No.	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Area	34	45	54	41	43	51	34	47	25
	Zone No.	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Part (c)	Area	24	43	47	51	44	–	–	–	–
	Zone No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Area	74028	42	15	49	112	19	63	40	58
	Zone No.	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Area	77	26	52	33	27	45	29	39	47
	Zone No.	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	Area	48	48	24	46	70	20	30	–	–

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

Table 6

Corrosion rate and hardness in different aluminum alloys corroded under different environmental temperatures

Identification code	$D_{\max} [\mu m]$	R	HB_1	HB_2	HB_3	HB_{ave}
2024 X	907.5	0.011307	13.2	12.1	12.8	12.7
2024 K	525.0	0.002953	11.3	10.6	10.3	10.7
2024 Y	827.0	0.015224	11.7	13.0	12.2	12.3
6061 X	644.5	0.009767	16.2	15.6	14.6	15.5
6061 K	369.3	0.003008	13.3	13.2	13.1	13.2
6061 Y	749.0	0.015612	12.5	11.0	11.8	11.7
7075 X	513.5	0.021644	21.7	23.5	20.3	21.8
7075 K	570.0	0.016127	19.2	18.2	20.2	19.1
7075 Y	639.3	0.014305	21.2	21.5	21.8	21.5

Source: made by K. Reza Kashyzadeh, S. Ghorbani, A.S. Averyanov

As is clear from the microscopic images, the number of corrosion damages on the surface of 7075 aluminum samples is much higher than the others, with the difference that the size of the pits is smaller. The corrosion rate in each of the samples, along with the hardness measurements including three different points and their average, are given in Table 6. In this table, $D_{\max}$ and R represent the maximum size of the maximum corrosion damage on the surface and corrosion ratio, respectively. Also, HB_i is the Brinell hardness at i th measurement, and the average value is indicated by HB_{ave} .

Conclusion

In this study, the authors investigated the corrosion rates of various series of aluminum alloys in the vicinity of a corrosive solution with a pH of 12 and different environmental temperatures in the laboratory. The most important achievements of this study are as follows:

- The largest corrosion damage occurred in aluminum alloy 2024 and in the vicinity of cold air.
- The highest corrosion rate was observed for aluminum alloy 7075 in the vicinity of cold air.
- Among all the studied aluminum alloys (2024, 6061, and 7075), the highest hardness was

observed when the corrosion test was performed in the vicinity of cold air.

– The lowest corrosion rate was observed for aluminum samples 2024 and 6061 when the corrosive solution was at room temperature.

– Considering the different experimental conditions, it can be concluded that aluminum 6061 has the highest corrosion resistance, and aluminum 7075 has the lowest corrosion resistance.

References

1. Forouzanmehr M, Reza Kashyzadeh K, Borjali A, Ivanov A, Jafarnode M, Gan TH, Wang B, Chizari M. Detection and analysis of corrosion and contact resistance faults of TiN and CrN coatings on 410 stainless steel as bipolar plates in PEM fuel cells. *Sensors*. 2022;22(3):750. <https://doi.org/10.3390/s22030750> EDN: FBTKTV
2. Reza Kashyzadeh K, Amiri N, Maleki E, Unal OA. Critical Review on Improving the Fatigue Life and Corrosion Properties of Magnesium Alloys via the Technique of Adding Different Elements. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(3):527. <https://doi.org/10.3390/jmse11030527> EDN: MJWVAC
3. Reza Kashyzadeh K. Effect of Corrosive Environment on the High-Cycle Fatigue Behavior of Reinforced Concrete by Epoxy Resin: Experimental Study. *Polymers*. 2023;15(19):3939. <https://doi.org/10.3390/polym15193939> EDN: AXUORK
4. *Corrosion of metals and alloys — Vocabulary*. ISO 8044:2020(E). Available from: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/71134/642505f174ad4feeb2eef113b494d4e4/ISO-8044-2020.pdf> (accessed: 12.06.2024)
5. Tirumala RK, Sarthak P, Satvik S, Rajeev R, Parth SS. Corrosion of different metals/alloys in soil environment: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.537> EDN: CCVZUK
6. Pierluigi T, Elisa C. A review of studies on corrosion of metals and alloys in deep-sea environment. *Ocean Engineering*. 2014;87(1):10–15. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.05.003>
7. Ghali E. *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing*. John Wiley & Sons., 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470531778> ISBN: 978-0-471-71576-4 EDN: RNAKAT
8. Hamed C, Farzad N, Baharak M, Ali J. Failure analysis and preventive recommendations against corrosion of steel tubes of gas risers in natural gas urban distribution lines. *Engineering Failure Analysis*. 2021;122:105240. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105240> EDN: PJZSCX
9. Mouloudi M, El Guerraf A, Chhiba M, Chafi M, Essahli M. Numerical Model of Aluminum Pitting Corrosion in a 1M Sodium Chloride Solution Using Secondary Current Distribution. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*. 2024;10(3):48. <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00851-3> EDN: EPUWGG
10. Varney J, Thompson N, Moghissi O, Gould M, Payer J. *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. Houston, Texas; 2016.
11. Averyanov AS, Ghorbani S, Reza Kashyzadeh K. Industrial techniques of corrosion prevention in aluminum alloys. *Proceedings of the International Conference “Engineering Systems — 2023”*. Moscow: RUDN University Publ.; 2023. p. 144–154. EDN: QSMINB
12. Jiang J, Liu HT, Wan T, Zhang K, Li J, Zhang MY. Effect of Aging Treatment on Micro-Structural and Stress Corrosion Behavior of 7050 Aluminum Alloy. 2023;23:655–672. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4829868>
13. Wan NW, Sulaiman O, Ayob AF, Ahmad MF, Rahman MM. Marine Extracts as Corrosion Inhibitor for Aluminum in Seawater Applications. *Journal of Engineering Research and Applications*. 2012;2(1):455–458. EDN: LRWDGB
14. Paglia CS, BuchheitRG. A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds. *Scripta Materialia*. 2008;58(5):383–387. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.043> EDN: KNMUTZ
15. Xu X, Li W, Wan B, Jin S, Chen K, Su F. Extremely improved the corrosion resistance and anti-wear behavior of aluminum alloy in 3.5% NaCl solution via amorphous CrAlN coating protection. *Corrosion Science*. 2024;230:111952. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.111952> EDN: VZKULX
16. Sánchez-Amaya JM, Bethencourt M, González-Rovira L, Botana FJ. Noise resistance and shot noise parameters on the study of IGC of aluminium alloys with different heat treatments. *Electrochimica Acta*. 2007;52(23):6569–6583. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.04.094> EDN: KEMKFX
17. Li X, Wang G, Kou L, Zhang P, Du J, Liu H, Shang X. Corrosion pit-induced stress concentration in 7005 aluminium alloy: Mechanical degradation and pit parameter analysis. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024;301:110024. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110024> EDN: PBLINI
18. Zhang PX, Yan H, Liu W, Zou XL, Tang BB. Effect of T6 heat treatment on microstructure and hardness of nanosized Al₂O₃ reinforced 7075 aluminum matrix composites. *Metals*. 2019;9(1):44. <https://doi.org/10.3390/met9010044>
19. Wang Y, Huang G, Huang H, Zheng. High temperature corrosion behavior of ADC12 aluminum alloy in

oxalic acid solution. *Corrosion Science*. 2024;232:112028. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112028> EDN: XZSQUU

20. Kharitonov DS, Örnek C, Claesson PM, Som-mertune J, Zharskii IM, Kurilo II, Pan J. Corrosion inhibition

of aluminum alloy AA6063-T5 by vanadates: microstruc-ture characterization and corrosion analysis. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018;165(3):C116. <https://doi.org/10.1149/2.0341803jes> EDN: YBDCRV

About the authors

Kazem Reza Kashyzadeh, Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering and Technology of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0552-9950; e-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Siamak Ghorbani, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8272-2337, ORCID: 0000-0003-0251-3144; e-mail: gorbani-s@rudn.ru

Andrey S. Averyanov, PhD student of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9650-9795, ORCID: 0009-0007-0985-3869; e-mail: 1142220720@rudn.ru

Сведения об авторах

Ре́за Каши́и Заде́ Казе́м, кандидат технических наук, профессор кафедры техники и технологий транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0552-9950; e-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Горба́ни Си́амак, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 8272-2337, ORCID: 0000-0003-0251-3144; e-mail: gorbani-s@rudn.ru

Аве́рьянов Андре́й Серге́евич, аспирант кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Рос-сийский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9650-9795, ORCID: 0009-0007-0985-3869; e-mail: 1142220720@rudn.ru