



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

2025 Том 26 № 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2

<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 23.06.2025. Выход в свет 30.06.2025. Формат 60×84/8.

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

Усл. печ. л. 11,4. Тираж 500 экз. Заказ № 760. 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 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2

<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

Baranov A.A., Olivio A.P. Modified Algorithm for Calculating the Parameters of Maneuvers of Coplanar Meeting of Spacecraft in a Near-Circular Orbit Using Low-Thrust Engines (Модифицированный алгоритм расчета параметров маневров копланарной встречи космических аппаратов на около-круговой орбите с использованием двигателей малой тяги)	113
Reza Kashyzadeh K., Kupreev S.A., Samusenko O.E. Analytical Review of the Common Failures of Satellite Structures: Causes, Effects, and Mitigation Strategies (Аналитический обзор распространенных отказов спутниковых конструкций: причины, последствия и стратегии смягчения последствий)	127
Рыжков В.В. Угловая стабилизация мультироторного летательного аппарата в атмосфере Венеры ..	135
Меркулов А.С., Степанян И.В. Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений	144
Алексеев В.В., Иванов Д.А., Рыжов И.Г. Обеспечение живучести сложной технической системы в специальных условиях	155
Temirbayeva A.B., Altybay A. Machine Learning Methods for Predicting Cardiovascular Diseases: A Comparative Analysis (Методы машинного обучения для прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний: сравнительный анализ)	168
Zhu Q., Sigitov O.Yu. Development of an Energy Complex of Wind Farms and Thermal Power Plants in China (Разработка энергетического комплекса из ветровых и тепловых электростанций в условиях Китая)	181
Osamah A., Sigitov O.Yu. The Energy Complex of Wind and Thermal Power Plants: Development in Iraq (Энергетический комплекс ветровых и тепловых электростанций: разработка в условиях Ирака)	194

CONTENTS

Baranov A.A., Olivio A.P. Modified Algorithm for Calculating the Parameters of Maneuvers of Coplanar Meeting of Spacecraft in a Near-Circular Orbit Using Low-Thrust Engines	113
Reza Kashyzadeh K., Kupreev S.A., Samusenko O.E. Analytical Review on the Common Failures of Satellite Structures: Causes, Effects, and Mitigation Strategies	127
Ryzhkov V.V. Angular Stabilization of a Multicopter Aircraft in Venus' Atmosphere	135
Merkulov A.S., Stepanyan I.V. General Mathematical Principles for Determining the Engineering Concept of Apartment Buildings Based on Expert Analytical Methods and Decision Support Systems	144
Alekseev V.V., Ivanov D.A., Ryzhov I.G. Ensuring the Survivability of a Complex Technical System Under Special Conditions	155
Temirbayeva A.B., Altybay A. Machine Learning Methods for Predicting Cardiovascular Diseases: A Comparative Analysis	168
Zhu Q., Sigitov O.Yu. Development of an Energy Complex of Wind Farms and Thermal Power Plants in China	181
Osamah A., Sigitov O.Yu. The Energy Complex of Wind and Thermal Power Plants: Development in Iraq	194



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-113-126
EDN: LFD TLM

Research article / Научная статья

Modified Algorithm for Calculating the Parameters of Maneuvers of Coplanar Meeting of Spacecraft in a Near-Circular Orbit Using Low-Thrust Engines

Andrey A. Baranov^a, Adilson P. Olivio^b✉

^aKeldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ pedrokekule@mail.ru

Article history

Received: November 27, 2024

Revised: February 12, 2025

Accepted: February 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. A modified algorithm is presented for solving the problem of spacecraft rendezvous in a near-circular orbit. The study considers the calculation of maneuver parameters executed on several turns using a low-thrust propulsion system. It is assumed that the active spacecraft performs maneuvers within a predefined region around the target spacecraft, while the perturbative effects of Earth's gravitational field non-centrality and atmospheric drag are neglected. Well-established approximate mathematical models of spacecraft motion are employed to address the rendezvous problem. The methodology of determining the parameters of maneuvers is structured into three key stages: in the first and third stages, the parameters of impulsive transfer and low-thrust transfer are determined using analytical methods. In the second stage, maneuvers are allocated across the available turns to ensure a successful rendezvous by minimizing a selected control variable. The proposed approach is distinguished by its computational efficiency and robustness, making it suitable for onboard implementation in autonomous spacecraft navigation systems. As a case study, the paper analyzes the dependence of total characteristic velocity required for rendezvous on the magnitude of engine thrust and provides a comparative assessment of the total characteristic velocity for both impulsive and low-thrust maneuvering scenarios.

Keywords: spacecraft rendezvous, near-circular orbit, velocity impulse, maneuver parameters, approximate mathematical models, low-thrust propulsion

Authors' contribution

Baranov A.A. — research concept, validation, project supervision; Olivio A.P. — theory development, performing calculations, writing the text.

Funding

This paper has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. FSSF-2024-0005.

Data Availability Statement

All data, models, and code generated or used during the study appear in the submitted article.

For citation

Baranov AA, Olivio AP. Modified algorithm for calculating the parameters of maneuvers of coplanar meeting of spacecraft in a near-circular orbit using low-thrust engines. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):113–126. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-113-126>

© Baranov A.A., Olivio A.P., 2025



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

Модифицированный алгоритм расчета параметров маневра копланарной встречи космических аппаратов на околокруговой орбите с использованием двигателей малой тяги

А.А. Баранов^a, А.П. Оливьо^b

^a Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ pedrokekule@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 ноября 2024 г.

Доработана: 12 февраля 2025 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Представлен модифицированный алгоритм решения задачи сближения космических аппаратов на околокруговой орбите. Рассмотрен расчет параметров маневра, выполняемого на нескольких витках с использованием двигательной установки малой тяги. Предполагается, что активный космический аппарат выполняет маневры в пределах заданной области вокруг целевого космического аппарата, при этом возмущающими эффектами нецентральности гравитационного поля Земли и атмосферного сопротивления пренебрегают. Для решения задачи сближения использованы хорошо зарекомендовавшие себя приближенные математические модели движения космического аппарата. Методология определения параметров маневров структурирована на три ключевых этапа: на первом и третьем этапах параметры импульсной передачи и передачи малой тяги определяются с использованием аналитических методов. На втором этапе маневры распределяются между доступными поворотами, чтобы обеспечить успешное сближение за счет минимизации выбранной управляющей переменной. Предлагаемый подход отличается своей вычислительной эффективностью и надежностью, что делает его пригодным для бортовой реализации в автономных навигационных системах космических аппаратов. В качестве примера в статье анализируется зависимость суммарной характеристической скорости, необходимой для сближения, от величины тяги двигателя и приводится сравнительная оценка суммарной характеристической скорости как для сценариев импульсного маневрирования, так и для маневрирования с малой тягой.

Ключевые слова: сближение космических аппаратов, околокруговая орбита, приближенные математические модели, двигательная установка малой тяги

Вклад авторов

Баранов А.А. — концепция исследования, валидация, руководство проектом; Оливьо А.П. — разработка теории, выполнение расчетов, написание текста.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № FSSF-2024-0005.

Заявление о доступности данных

Все данные, модели и код, сгенерированные или использованные в ходе исследования, приведены в представленной статье.

Для цитирования

Baranov A.A., Olivio A.P. Modified algorithm for calculating the parameters of maneuvers of coplanar meeting of spacecraft in a near-circular orbit using low-thrust engines // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 113–126. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-113-126>

Introduction

The rendezvous of spacecraft (SC) in near-circular orbits is a highly intricate and technically demanding problem in astronautics. Its complexity arises from the interplay of nonlinear orbital dynamics, gravitational perturbations, and control constraints, all of which must be carefully managed to achieve mission success. The precise execution of spacecraft rendezvous is fundamental to a wide range of space operations, including satellite servicing, space station resupply, and autonomous docking maneuvers.

The choice of methodology for spacecraft rendezvous is strongly influenced by mission-specific objectives, which can vary significantly depending on operational requirements. These objectives dictate the selection of optimal control strategies, trajectory planning techniques, and guidance algorithms, all of which must balance fuel efficiency, time constraints, and navigational accuracy.

As advancements in space technology continue to push the boundaries of autonomous operations, the development of robust and efficient rendezvous strategies remains a critical area of research in astronautics. For instance, the trajectory optimization strategies used for SC rendezvous in near-circular orbits differ fundamentally from those applied in atmospheric observation missions. These disparities arise from variations in spacecraft modeling and the corresponding control system architecture.

In the realm of commercial and operational spaceflight, SC rendezvous problems exhibit notable similarities. While fundamental rendezvous algorithms have been developed and successfully implemented, continuous refinement is necessary to enhance their precision and efficiency. Typically, rendezvous operations involve two spacecraft: an active vehicle executing maneuvering procedures and a passive target following a free-flight trajectory. This paper aims to propose a modified algorithm for optimizing spacecraft rendezvous in near-circular orbits, ensuring maximum efficiency and accuracy while adhering to operational constraints.

The problem of spacecraft rendezvous in near-circular orbits using low-thrust propulsion is of

critical importance in contemporary spaceflight. It plays a fundamental role in various applications, including coordinated spacecraft formations, satellite constellation deployment, active debris removal, and on-orbit servicing missions. Since the mid-20th century, electric propulsion systems have been extensively employed due to their high specific impulse, which significantly reduces propellant consumption rate for orbital maneuvers. However, the inherently low thrust of these systems results in prolonged maneuver durations, which must be meticulously accounted for in mission planning and control strategies.

Optimal low-thrust maneuvering has been extensively investigated in previous studies [1–12]. Of particular relevance are the contributions in [3–7], which address trajectory optimization under stringent constraints. Due to the mathematical complexity of low-thrust trajectory planning, numerical approaches based on Pontryagin's Maximum Principle and the continuation method have been traditionally employed. More recently, interior point methods [8] have gained prominence, demonstrating efficacy in solving largescale maneuvering problems.

Over the past two decades, spacecraft rendezvous has remained an active field of research [3–5; 9; 10]. Initial studies predominantly focused on high-thrust rendezvous strategies in near-circular orbits [11; 12], successfully addressing short-duration rendezvous (within three orbital revolutions) and classical mid-term rendezvous scenarios in coplanar circular orbits. Given the evolving landscape of space operations, continued advancements in rendezvous algorithms are essential to support emerging mission architectures and operational requirements.

Currently, the problem of multi-impulse spacecraft maneuvers remains one of the central challenges in astrodynamics, requiring the development of increasingly efficient and reliable computational methods. Due to the inherent complexity of this problem, contemporary approaches typically adopt a multi-stage resolution framework that combines analytical and numerical techniques.

The primary difficulty in formulating and solving these problems arises from the need to

model space trajectories under multiple dynamic and operational constraints. To address these challenges, various algorithms have been proposed to decompose the solution into structured steps, as demonstrated in studies [13–21].

Analytical methods, as presented in [13–17], are widely used to solve orbital maneuvering and orbital plane rotation problems independently. Although this approach may lead to an increase in the total characteristic velocity required for maneuvers, it is advantageous due to its simplicity and operational reliability.

Additionally, numerical methods have been employed to determine optimal solutions in highly complex multi-impulse scenarios, taking into account specific constraints, as detailed in [18; 19]. The authors of [20; 21] developed efficient algorithms for maneuver parameter calculations, which are widely used due to their accuracy and applicability.

An alternative based on solving Lambert's problem was presented in [21]. In this approach, the parameters corresponding to a two-impulse trajectory are initially determined, followed by an analysis of the behavior of the hodograph of the base vector associated with the solution. If necessary, additional velocity impulses are introduced to refine the trajectory and ensure an optimized solution.

Finally, the studies [4; 22] propose hybrid numerical-analytical methods for solving multi-impulse rendezvous problems, aiming to effectively address contemporary practical challenges. These approaches integrate the principles established in previous studies [13–21], providing a more comprehensive solution adapted to the demands of modern astrodynamics.

This paper presents a modified algorithm with enhanced capabilities for addressing the rendezvous problem of two SC in near-circular orbits under low-thrust propulsion. The proposed modification of this algorithm aims to overcome the limitations of existing methods, which often fail to obtain viable solutions in low-thrust regimes, as demonstrated in study [9]. With the implemented improvements, it becomes possible to successfully execute

maneuvers even under minimal thrust conditions, thereby expanding the algorithm's applicability.

In this study, the SC rendezvous problem is analyzed both from the perspective of impulsive maneuvers and considering the continuous operation of low-thrust propulsion systems. In contrast to previous studies [3–6; 9], which employed different strategies for solving the rendezvous problem in coplanar orbits, the proposed algorithm offers a more comprehensive approach, being applicable both in ground-based control centers and onboard satellites, thus enabling greater operational autonomy.

Various specialized mathematical models are used to describe the relative motion of spacecraft in near-circular orbits. One of the most widely employed is the Hill-Clohessy-Wiltshire (HCW) model [23; 24], which assumes that the separation between SC is small compared to the orbital radius. However, in this study, we adopt an alternative linearized formulation derived in [25], which provides greater accuracy and applicability for maneuver planning in low-thrust regimes.

With the increasing number of SC and the growing demand for real-time problem-solving, there is a significant shift toward onboard computation of maneuver parameters. This necessitates the development of computationally efficient and highly reliable algorithms. The proposed method meets these requirements, ensuring computational robustness and enhancing the feasibility of autonomous execution of orbital maneuvers.

1. Mathematical Formulation of the Rendezvous Problem

The maneuver planning for a spacecraft transferring between two closely spaced near-circular orbits is analyzed within the framework of unperturbed Keplerian motion. The problem is approached using an approximate impulsive model, where the trajectory is discretized into N velocity impulses applied over a predefined time horizon. By employing a linearized approximation, the conditions governing the transition from an initial orbit to a target coplanar orbit can be expressed as follows [26; 27]:

$$\Delta V_{r1} \sin \alpha_1 + 2\Delta V_{t1} \cos \alpha_1 + \dots + \Delta V_{rN} \sin \alpha_N + 2\Delta V_{tN} \cos \alpha_N = \Delta e_x; \quad (1)$$

$$-\Delta V_{ri} \cos \alpha_1 + 2\Delta V_{ti} \sin \alpha_1 + \dots - \Delta V_{rN} \cos \alpha_N + 2\Delta V_{tN} \sin \alpha_N = \Delta e_y; \quad (2)$$

$$\Delta V_{t1} + \Delta V_{t2} + \Delta V_{t3} + \dots + \dots + \Delta V_{tN} = \Delta a / 2; \quad (3)$$

$$2\Delta V_{r1}(1 - \cos \alpha_1) + \Delta V_{t1}(-3\alpha_1 + 4\sin \alpha_1) + \dots + 2\Delta V_{rN}(1 - \cos \alpha_N) + \Delta V_{tN}(-3\alpha_N + 4\sin \alpha_N) = \Delta t, \quad (4)$$

$$\text{where } \Delta a = (a_f - a_0) / r_0, \quad \Delta t = n_0(t_f - t_0),$$

$$\Delta V_{ti} = \Delta V_{ti}^* / V_0, \quad \Delta V_{ri} = \Delta V_{ri}^* / V_0.$$

Here, a_f and a_0 represent semi-major axes of the orbits. The initial and final time is given by t_f and t_0 . The reference circular orbit, characterized by a radius r_0 such that $r_0 = a_f$, imposes the constraints V_0 and n_0 , which respectively represent the orbital velocity and angular velocity of the spacecraft's motion. The maneuvering strategy consists of N discrete velocity impulses, each applied at an angle ϕ_i , measured from the line connecting the spacecraft to the target point in the direction of motion. The i -th velocity correction is decomposed into its transverse ΔV_{ti}^* and radial

ΔV_{ri}^* components, each playing a critical role in shaping the transfer trajectory.

The maneuver optimization problem is defined as minimizing the total characteristic velocity ΔV associated with the executed maneuvers:

$$\Delta V = \min \sum_{i=1}^N \Delta V_i = \min \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta V_{ri}^2 + \Delta V_{ti}^2}$$

under restrictions (1)–(6).

2. Algorithm for Solving the Rendezvous Problem

The rendezvous problem is solved based on the resolution of the orbital transfer problem. To achieve this, an algorithm presented in papers [9; 27] is employed, where the authors assume that

the correction of the eccentricity vector and the impulse application angles can be performed by applying velocity impulses at optimal points along the trajectory. The determination of these points is formalized by the following expressions:

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{\Delta e_y}{\Delta e_x}, \quad \alpha_1 = \alpha_e, \quad \alpha_2 = \alpha_1 + \pi,$$

where α_e is the angle defining the optimal direction for correcting deviations in the eccentricity vector.

The optimization conditions result in three distinct categories of solutions, as presented in [4; 27]. The optimal impulse magnitudes can be obtained from the analysis of the first three equations of system (1)–(4), following the approach described below:

$$\Delta V_{1t} = (\Delta a + \Delta e) / 4; \quad (5)$$

$$\Delta V_{2t} = (\Delta a - \Delta e) / 4. \quad (6)$$

Once the optimal impulse magnitudes are determined, they will be used as initial approximations to solve the rendezvous problem. Subsequently, the velocity impulses ΔV_{t1} and ΔV_{t2} are distributed over the N available orbital revolutions designated for maneuver execution [9; 27]:

$$\Delta V_{1t} = \Delta V_{1t1} + \Delta V_{1t2} + \dots + \Delta V_{1tN}; \quad (7)$$

$$\Delta V_{2t} = \Delta V_{2t1} + \Delta V_{2t2} + \dots + \Delta V_{2tN}. \quad (8)$$

The next goal is to determine the distribution of velocity impulses over the turns in a manner that satisfies equation (4). We will adopt a significant simplification, assuming that the variation of velocity impulses over the turns occurs linearly to make the analysis more tractable, that is, allowing the approximation to reduce the complexity of the meeting problem:

$$\Delta V_{1ti} = \Delta V_{1t1} + (i-1)(\Delta V_{1tN} - \Delta V_{1t1}) / (N-1); \quad (9)$$

$$\Delta V_{2ti} = \Delta V_{2t1} + (i-1)(\Delta V_{2tN} - \Delta V_{2t1}) / (N-1). \quad (10)$$

Therefore, substituting the values of the velocity impulses determined using expressions (9) and (10) into equations (7) and (8), we will obtain the following equations:

$$\Delta V_{1tN} = \frac{2\Delta V_{1t}}{N} - \Delta V_{1t1}; \quad (11)$$

$$\Delta V_{2tN} = \frac{2\Delta V_{2t}}{N} - \Delta V_{2t1}. \quad (12)$$

Consequently, substituting the obtained values $\Delta V_{1tN}, \Delta V_{2tN}$ into equations (9) and (10), we obtain:

$$\Delta V_{1ti} = [2(i-1)\Delta V_1 + N(N+1-2i)\Delta V_{1t1}] / N(N-1); \quad (13)$$

$$\Delta V_{2ti} = [2(i-1)\Delta V_2 + N(N+1-2i)\Delta V_{2t1}] / N(N-1). \quad (14)$$

Thus, we found the values of all velocity impulses expressed only through ΔV_{1t1} and ΔV_{2t1} . Substituting them into equation (3), we obtain a linear equation with two unknowns $\Delta V_{1t1}, \Delta V_{2t1}$. The coefficients of the velocity impulses are known, since their angles of application are known:

$$\alpha_{1i} = \alpha_e + 2\pi(N_i - N); \quad (15)$$

$$\alpha_{2i} = \alpha_e + \pi + 2\pi(N_i - N). \quad (16)$$

By iterating the value of the variable ΔV_{1t1} , within the specified interval, we determine the corresponding value of the variable ΔV_{2t1} for each case based on equation (3).

Next, the values of all velocity impulses are calculated based on equations (13) and (14). The sum of the magnitudes of these impulses defines the total characteristic velocity for each obtained solution. The solution corresponding to the lowest total characteristic velocity is considered the optimal rendezvous trajectory. If the total characteristic velocity of the selected solution matches that of the transfer problem, it can be inferred that the trajectory with the minimum achievable characteristic velocity has been determined.

In the next step, the duration of each identified maneuver is estimated using the following formula:

$$\Delta \phi_i = \frac{\omega_c}{\omega} \Delta V_i, \quad (17)$$

where ω_c is the represents the centripetal acceleration of the reference circular orbit, ω is the

acceleration generated by the propulsion system, m denotes the mass of the active SC, T is the thrust of its engine.

If $\Delta \phi_i \leq 20^\circ$ (the duration of the largest velocity impulse), the solution can be considered approximately equivalent to an impulsive-based approach, and the problem is considered resolved. However, when the maneuver duration becomes significant, the solution shifts to one that involves low thrust.

3. Solving the Problem With “Low Thrust”

The velocity impulses applied for each turn result, in a certain way, in the change in eccentricity and semi-major axis, so to take these changes into account we will use the following expressions:

$$\Delta e_i = 2\Delta V_{1ti} - 2\Delta V_{2ti}; \quad (18)$$

$$\Delta a_i = 2\Delta V_{1ti} + 2\Delta V_{2ti}. \quad (19)$$

Therefore, we calculate the necessary duration of low-impulse maneuvers that will result in the same change in these elements [25]:

$$\begin{aligned} \Delta \phi_1 &= \frac{\omega_c \Delta a}{4\omega n} + 2 \arcsin \left[\frac{\omega_c \Delta e}{8\omega n \cos\left(\frac{\omega_c \Delta a}{8\omega n}\right)} \right]; \\ \Delta \phi_2 &= \frac{\omega_c \Delta a}{4\omega n} - 2 \arcsin \left[\frac{\omega_c \Delta e}{8\omega n \cos\left(\frac{\omega_c \Delta a}{8\omega n}\right)} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Thus, the duration of each maneuver is determined iteratively, turn by turn, ensuring the successful resolution of the low-thrust problem. If the arcsine argument exceeds unity, no feasible solution exists under the given thrust constraints and spacecraft mass for the specified number of orbital turns.

The computed low-thrust solution exhibits a similar evolution of the semi-major axis and eccentricity vector compared to the corresponding impulsive transfer. Equation (4) is satisfied with high accuracy, as the midpoints of the extended-duration maneuvers coincide with the instants at

which velocity impulses are applied in the impulsive case. This alignment ensures a comparable modification of the orbit's major axis and guarantees arrival at the designated rendezvous point within the required timeframe.

However, the rendezvous problem has been solved using linearized equations of motion, which neglect perturbative effects such as the non-centrality of the gravitational field, atmospheric drag, and other external influences. Consequently, the accuracy in satisfying the terminal conditions defined in system (1)–(6) remains insufficient. To enhance precision, an iterative correction scheme may be necessary [18; 19].

Furthermore, the previously proposed algorithm proved inadequate for rendezvous maneuvers involving spacecraft equipped with low-thrust engines of very small thrust magnitude [9]. As the thrust level decreases, the duration of certain critical maneuvers extends beyond the required correction time for the eccentricity vector. To mitigate this issue, the duration of these maneuvers is constrained to the upper bound at which the eccentricity correction remains maximized (180° change), while increasing the number of intermediate maneuvers. If these adjustments do not sufficiently impact the arrival time at the rendezvous point, an additional velocity impulse can be introduced at a specific orbital position. To compensate for the residual trajectory deviation at the rendezvous point in the absence of impulsive corrections, we subtract the effect of pre-defined discrete impulses (typically 4, 5, or 6, depending on their influence on the final arrival time). This approach ensures a more precise alignment with the target conditions while maintaining the feasibility of the low-thrust transfer strategy.

4. Algorithm for Solving the Meeting Problem When Fixing Velocity Impulses

The formulated rendezvous problem uses an algorithm that consists of the following stages:

1. For long-term maneuvers, we calculate how fixed (N impulses) maneuvers on the outer turns change the eccentricity and major semi-axis;

2. Then we solve the transfer problem for the remaining misses in eccentricity and major semi-axis;

3. We calculate the change in arrival time due to the influence of N impulses;

4. Then we distribute two new calculated velocity impulses between the remaining turns to correct the time miss remaining after the fixed impulses;

5. We determine the change in eccentricity and major semi-axis on each turn;

6. We take into account the duration of maneuvers;

7. If the new internal impulses are also greater than the permissible value, then the procedure is repeated, new fixed velocity impulses appear;

8. We calculate the total costs.

5. Examples of Solving the Coplanar Rendezvous Problem When Recording Velocity Impulses

Let us analyze the motion of a SC relative to a reference point O , which follows a near-circular orbit of radius 6871 km around the Earth, under the assumption of an unperturbed gravitational field. The Earth's gravitational parameter is taken as $3.9860044 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$. The objective is to resolve the problem of a flight, where the spacecraft performs N velocity impulses within a fixed time interval to transition from an initial orbit to a target location in phase space. The initial conditions are: $r_0 = (10, 100, -5) \text{ km}$ and $v_f = (0, 0, 0) \text{ m/s}$ with the goal of reaching the origin of the reference frame, i.e., $r_f = (0, 0, 0) \text{ km}$ and $v_f = (0, 0, 0) \text{ m/s}$ in the tenth turn $N=10$. The spacecraft has an initial mass of 1000 kg, and its propulsion system operates with a specific impulse of 220 s, corresponding to an effective exhaust velocity of 2157.463 m/s. The thrust magnitude varies within the range 0.19 to $0.362 N$.

Table 1 presents the parameters of the coplanar transition maneuvers, where the first velocity impulse is braking, and the second is accelerating. This occurs because the orbits intersect.

When addressing the rendezvous problem, the velocity impulses were not only distributed across

the turns, as shown in Figure 1, but also optimized with respect to a single parameter, ensuring compliance with the time constraint.

Solution to the problem with low thrust:

In certain instances, the previous solution algorithm is unavailable because the argument of the arcsine falls outside the range $(-1; 1)$. Additionally, as thrust increases, the maneuver duration decreases,

and the total velocity costs for the low-thrust solution with thrust entrainment align with those of the impulse-based solution. Table 2 shows the correction of eccentricity and semi-major axis using velocity impulses for each turn.

After correcting the orbital elements, Table 3 shows the calculated results for the problem with low thrust ($T = 0.362\text{N}$) for $N = 10$.

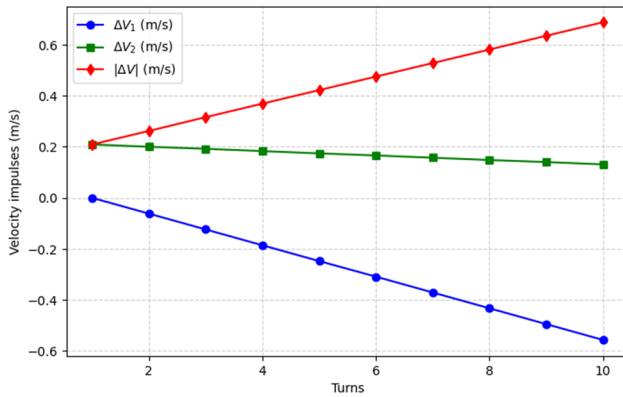


Figure 1. Distribution of the two-impulse optimal maneuvers by turns

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Results of the calculation the parameters of coplanar transition maneuvers

ΔV_1 m/s	$ \Delta V $ m/s	$ \Delta V $ m/s	α_e°	α_1°	α_2°
-2.785	1.7	4.485	6.4	186.4	366.4

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Results of the correction of eccentricity and semi-major axis by turns

N	$\Delta e_i (10^{-4})$	$\Delta a_{0i} (10^{-4})$
1	-0.5492	0.5485
2	-0.6888	0.3633
3	-0.8285	0.1781
4	-0.9682	-0.00711
5	-1.108	-0.1923
6	-1.248	-0.3775
7	-1.387	-0.5627
8	-1.527	-0.7479
9	-1.667	-0.9331
10	-1.806	-1.118

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Results of calculation of the problem with low thrust “ $T = 0.362\text{ N}$ ” for $N = 10$

N	ΔV_{1i} m/s	ΔV_{2i} m/s	$ \Delta V $ m/s	$\Delta \phi_{1i}^\circ$	$\Delta \phi_{2i}^\circ$	$ \Delta \phi ^\circ$
1	-0.002	0.211	0.213	-0.342	36.991	37.333
2	-0.064	0.202	0.266	-11.166	35.44	46.606
3	-0.126	0.193	0.319	-22.044	33.944	55.988
4	-0.188	0.186	0.374	-33.029	32.554	65.583
5	-0.252	0.179	0.431	-44.173	31.324	75.497
6	-0.317	0.173	0.49	-55.54	30.317	85.857
7	-0.383	0.169	0.552	-67.2	29.602	96.802
8	-0.452	0.167	0.619	-79.237	29.265	108.502
9	-0.523	0.168	0.691	-91.758	29.412	121.17
10	-0.598	0.172	0.77	-104.902	30.181	135.083
Σ	-2.903	1.818	4.721	-509.392	319.029	828.421

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

It can be stated that with such a thrust the problem is solved optimally and the introduction of fixed impulses is not required.

Further, in order to move to an algorithm with fixed maneuvers, it is necessary to solve the problem with such a low thrust that impulses appear greater than the permissible value. However, we are interested in solutions with a thrust of 0.24, 0.22, 0.21, 0.2 and 0.19 N , and thrusts less than 0.19 N are not interesting.

Figure 2 presents the results of calculating the problem with low thrusts for $T = 0.24, 0.22, 0.21, 0.2, 0.19 N$.

It can be seen that there is no solution, since the first maneuver is larger than permissible.

We can observe the evolution of the velocity impulses and durations of the maneuvers at the different thrust levels. With the increase in thrust, the velocity impulses and durations of the maneuvers in the last turns will not exist (this is visualized in the Figures of levels 2 to 5). In these same figures we can observe the reduction of the values of N , in reality there was no reduction, but rather the non-existence of the values of the velocity impulses and duration of the maneuvers in the last turns.

Next, we take one of the solutions presented in Figure 2 and transform it into a solution with fixed impulses. We fix the impulses on the last turn. The duration of the first impulse on the turn is -180 degrees, and the duration of the second impulse is 72 degrees. It is necessary to calculate and present in the table the influence of these impulses on the difference in the orbital elements (OE), compare the values of the orbital elements before and after the maneuvers are performed. After that, the standard algorithm for the first 9 turns presented in [9] can be applied.

Table 4 presents the orbital elements (eccentricity, semi-major axis, and flight time) before and after applying these fixed impulses. It is important to note that, to calculate the parameters for coplanar transfer maneuvers, new orbital elements must be calculated from the initial orbital elements. Here and everywhere, deviations (Δa and Δt) will be presented in dimensionless variables. Afterward,

we need to multiply by r_0 and λ_0 to convert them back to original units. These updated values will be defined in Table 5, and so on.

Table 4

Difference of orbital elements			
Orbital elements (OE)	OE ₁	OE ₂	Difference of OE
$\Delta e_i (10^{-4})$	-1.806	-1.655	-0.151
$\Delta a_{0i} (10^{-4})$	-1.118	-0.9823	-0.1357
$\Delta t_i (10^{-3})$	-12	-1.51	-0.1049

Note: **OE₁** = Orbital elements before impulse fixation and **OE₂** = Orbital elements after impulse fixation.

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Table 5

Results of calculation of parameters of coplanar transfer maneuvers		
ΔV_1 m/s	ΔV_2 m/s	$ \Delta V $ m/s
-2.283	1.572	3.855

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Subsequently, the changes in eccentricity and the semi-major axis for each turn are determined to satisfy the spacecraft's flight time condition, with the results presented in Table 6.

Table 6

Results of the correction of eccentricity and semi-major axis by turns		
N	$\Delta e_i (10^{-4})$	$\Delta a_{0i} (10^{-4})$
1	-0.499	0.4983
2	-0.6554	0.3219
3	-0.8119	0.1454
4	-0.9683	-0.0311
5	-1.125	-0.2074
6	-1.281	-0.3838
7	-1.438	-0.5603
8	-1.594	-0.7368
9	-1.75	-0.9132
10	-1.655	-0.9821

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Figure 3 shows the parameters of the optimal solution to the meeting problem for $N = 10$.

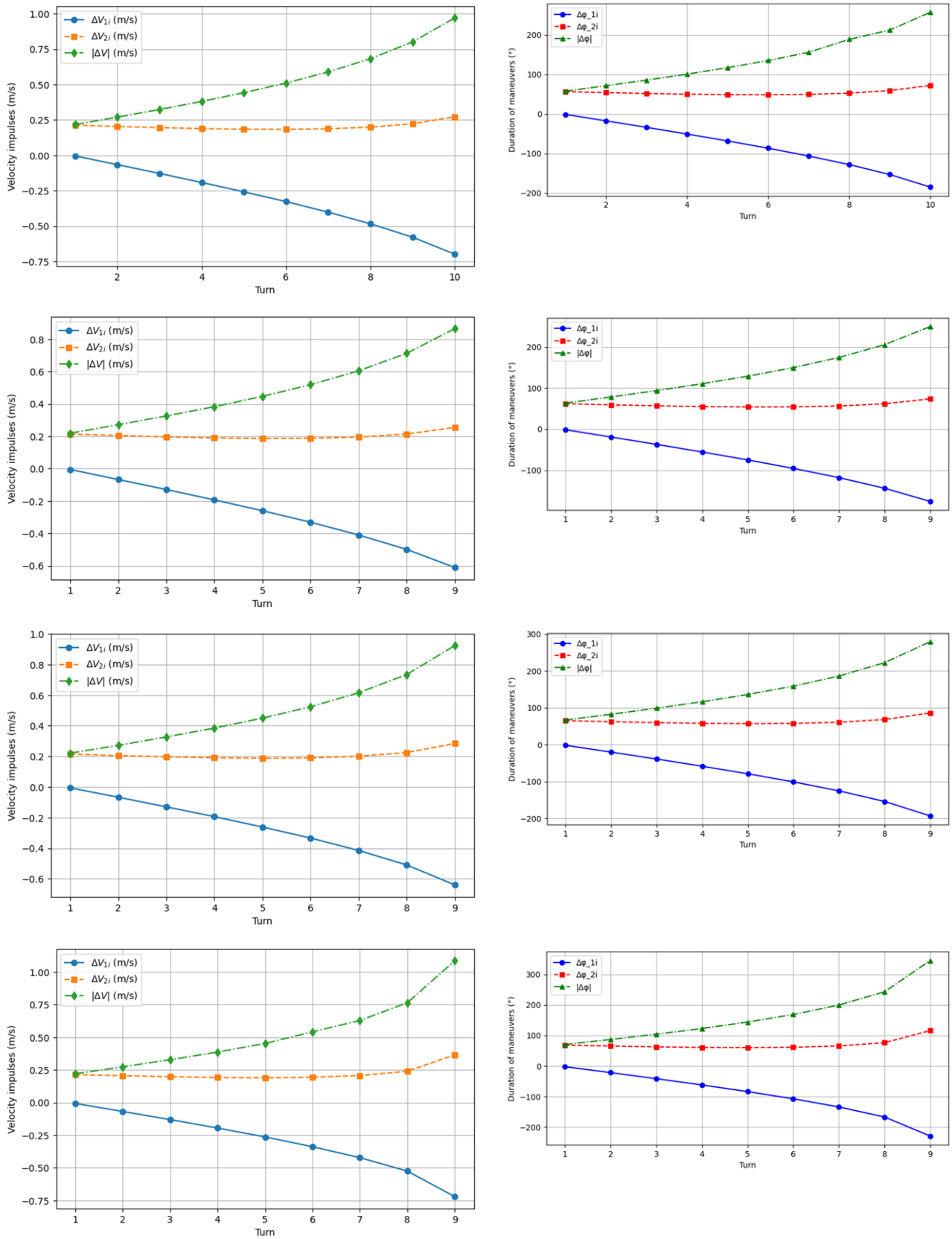


Figure 2. Results of calculation of the problem with low thrust for $N=10$
Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

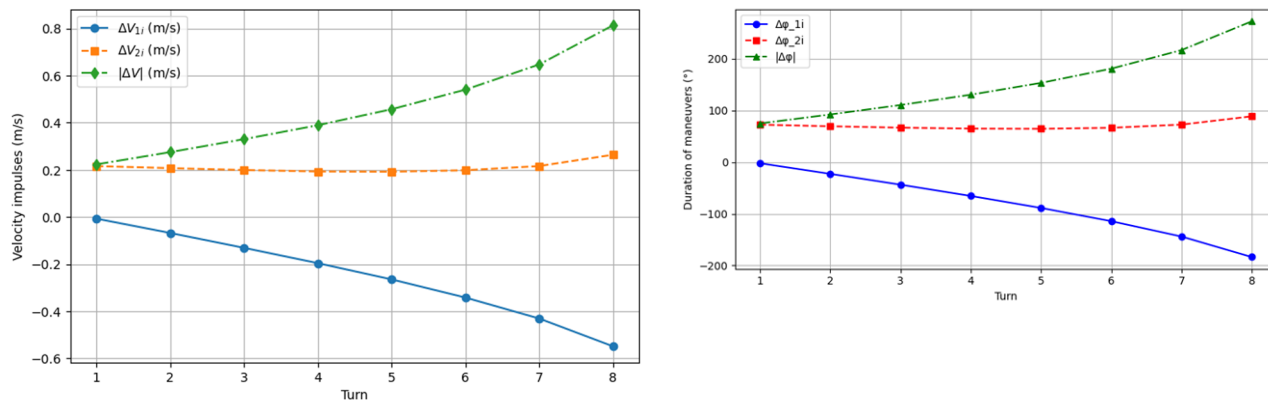


Figure 2. Results of calculation of the problem with low thrust for $N=10$ (continuation)

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

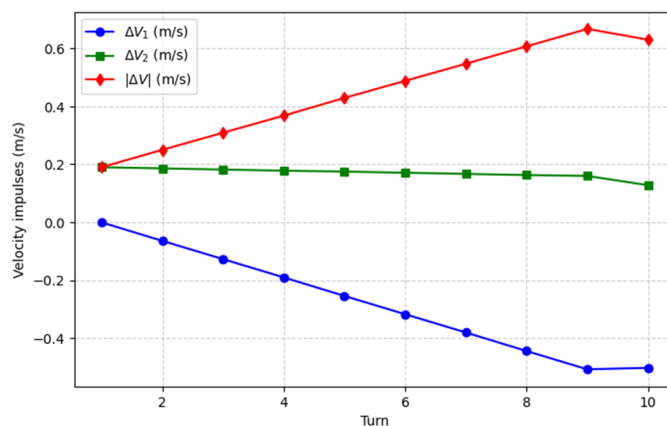


Figure 3. Distribution of the two-impulse optimal maneuvers by turns for the rendezvous problem

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

Table 7

Results of calculation of the problem with low thrust “ $T=0.22\text{ N}$ ” for $N=10$

N	ΔV_1 m/s	ΔV_2 m/s	$ \Delta V $ m/s	$\Delta\phi_{1i}^\circ$	$\Delta\phi_{2i}^\circ$	$ \Delta\phi ^\circ$
1	-0.004	0.194	0.198	-1.133	55.898	57.031
2	-0.067	0.19	0.257	-19.414	54.786	74.2
3	-0.132	0.187	0.319	-37.966	53.945	91.911
4	-0.198	0.186	0.384	-57.068	53.654	110.722
5	-0.267	0.188	0.455	-77.076	54.269	131.345
6	-0.341	0.195	0.536	-98.493	56.293	154.786
7	-0.423	0.21	0.633	-122.144	60.551	182.695
8	-0.519	0.238	0.757	-149.693	68.707	218.4
9	-0.645	0.297	0.942	-186.245	85.866	272.111
10	-0.623	0.249	0.872	-180	72	252
Σ	-3.219	2.134	5.353	-929.232	615.97	1545.202

Source: made by A.A. Baranov, A.P. Olivio

As shown in Figure 2, no solution was found for the tenth turn, as the maneuver durations exceeded the permissible limit. However, after applying the new algorithm, the results presented in Table 7 show that a solution for the tenth turn is now available. This indicates that the algorithm was successful.

Conclusion

The paper proposes a modified algorithm for calculating the parameters of a multi-turn rendezvous. The main advantage of the proposed algorithm is its simplicity and reliability, which allows it to be used not only in ground control centers, but also on board a spacecraft. At the same time, this modification of the algorithm for calculating the parameters of a multi-turn rendezvous allows us to obtain a solution to the problem at low thrust. The examples given in the article confirm the operability of this modified algorithm and the high quality of the resulting solution. Furthermore, the algorithm's ability to adapt to varying mission conditions, such as changes in thrust or trajectory, demonstrates its versatility and potential for broader applications in future space missions. This enhancement could significantly contribute to improving mission efficiency and accuracy, particularly for long-duration spaceflights requiring precise maneuvering.

References

1. Lebedev VN. *Calculation of the motion of a spacecraft with low thrust*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1968. (In Russ.)
2. Baranov AA. Methods of calculating maneuver parameters for rendezvous with orbital station. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2008;6:32. (In Russ.) EDN: OYFIUN
3. Petukhov VG, Olivio AP. Optimization of the Finite-Thrust Trajectory in the Vicinity of a Circular Orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2021;174:5–15. EDN: NYSWPX
4. Baranov A.A. *Maneuvering in the Vicinity of a Circular Orbit*. Moscow: Sputnik+ Publ.; 2016. (In Russ.) ISBN 978-5-9973-3872-5
5. Petukhov VG, Ivanyukhin A, Popov G, Testoyedov N, Yoon SW. Optimization of finite-thrust trajectories with fixed angular distance. *Acta Astronautica*. 2022;197:354–367. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.03.012> EDN: RDCMOJ
6. Petukhov VG. Method of continuation for optimization of interplanetary low-thrust trajectories. *Cosmic Research*. 2012;50(3):249–261. <https://doi.org/10.1134/S0010952512030069> EDN: HWNTUM
7. Baranov AA, De Prado AFB, Razumny VY, Baranov Jr. Optimal low-thrust transfers between close near-circular coplanar orbits. *Cosmic Research*. 2011;49(3):269–279. <https://doi.org/10.1134/S0010952511030014> EDN: OHRJVL
8. Ulybyshev YuP. Optimization of Multi-Mode Rendezvous Trajectories with Constraints. *Cosmic Research*. 2008;46(2):133–145. <https://doi.org/10.1134/S0010952508020056> EDN: LLKRDR
9. Baranov AA, Olivio AP. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;23(4):283–292. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-283-292> EDN: VBVJJK
10. Baranov AA, Roldugin DS. Six-impulse maneuvers for rendezvous of spacecraft in near-circular non-coplanar orbits. *Cosmic Research*. 2012;50(6):441–448. <http://doi.org/10.1134/S0010952512050012> EDN: RGNPGR
11. Prussing JE. Optimal two- and three-impulse fixed-time rendezvous in the vicinity of a circular orbit. *AIAA Journal*. 1970;8(7):46–56. <https://doi.org/10.2514/3.5876>
12. Marec JP. *Optimal Space Trajectories*. Studies in Astronautics; Vol.1. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Sci. Publ.; 1979.
13. Bulynin YuL. 2008. Ballistic support for control of orbital motion of geostationary spacecraft at various stages of operation. *13th International Scientific Conference "System Analysis, Control and Navigation"*, abstracts of reports, Crimea, Evpatoria, June 29 — July 6, 2008; 73–74. (In Russ.)
14. Rylov YuP. Control of a spacecraft entering a satellite system using electric rocket engines. *Space Research*. 1985;23(5):691–700. (In Russ.)
15. Kulakov AYU. *Model and algorithms for reconfiguration of the spacecraft motion control system*. St. Petersburg, 2017. (In Russ.)
16. Tkachenko IS. Analysis of key technologies for creating multisatellite orbital constellations of small spacecraft. *Ontology of designing*. 2021;11(4): 478–499. (In Russ.) <http://doi.org/10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499> EDN: SGVMYK
17. Bazhinov IK, Gavrilov VP, Yastrebov VD, et al. *Navigation support for the flight of the orbital complex "Salyut-6-Soyuz-Progress"*. Moscow: Science, Nauka Publ.; 1985. (In Russ.)
18. Baranov AA. Algorithm for calculating the parameters of four-impulse transitions between close al-most-circular orbits. *Cosmic Research*. 1986;24(3):324–327.

19. Lidov M.L. 1971. Mathematical analogy between some optimal problems of trajectory corrections and selection of measurements and algorithms of their solution. *Cosmic Res.* 1971;5:687–706.
20. Gavrilov V, Obukhov E. Correction problem with fixed number of impulses. *Cosmic Res.* 1980;2:163–172.
21. Lyon P.M., Handelsman M. Basis vector for impulsive trajectories with a given flight time. *Rocketry and Cosmonautics.* 1968;6(1):153–160. (In Russ.)
22. Bragazin A.F., Uskov A.V. Transfers with a rendezvous lasting no more than one orbit between close near-circular coplanar orbits. *Space Engineering and Technology.* 2020;3(30):82–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.33950/space-tech-2308-7625-2020-3-82-93> EDN: DTVFZH
23. Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous. *Journal of the Aerospace Sciences.* 1960;27(9):653–678. <https://doi.org/10.2514/8.8704>
24. Hill G.W. Researches in Lunar Theory. *American Journal of Mathematics.* 1878;1(1):5–26. <https://doi.org/10.2307/2369430>
25. Elyasberg P.E. *Introduction to the Theory of Flight of Artificial Earth Satellites.* Moscow: Science, 1965. (In Russ.)
26. Edelbaum T.N. Minimum Impulse Transfer in the Vicinity of a Circular Orbit. *Journal of the Astronautical Sciences.* 1967;XIV(2):66–73.
27. Olivio A. Complanar encounter of two space vehicles in a near-circular orbit using a low thrust engine. *International research journal.* 2024;4(142):7. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.155> EDN: TPMDHL

Список литературы

1. Лебедев В.Н. Расчет движения космического аппарата с малой тягой. Москва : Изд. ВЦ АН СССР, 1968. 108 с.
2. Баранов А.А. Методика расчета параметров маневров встречи КА с орбитальной станцией // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 6. 32 с. EDN: OYFIUN
3. Petukhov V.G., Olivio A.P. Optimization of the Finite-Thrust Trajectory in the Vicinity of a Circular Orbit // *Advances in the Astronautical Sciences.* 2021. Vol. 174. P. 5–15. EDN: NYSWPX
4. Баранов А.А. Маневрирование в окрестности круговой орбиты. Москва : Спутник+, 2016. 512 с. ISBN 978-5-9973-3872-5
5. Petukhov V.G., Ivanyukhin A., Popov G., Testoyedov N., Yoon S.W. Optimization of finite-thrust trajectories with fixed angular distance // *Acta Astronautica.* 2022. Vol.197. P. 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.03.012> EDN: RDCMOJ
6. Petukhov V.G. Method of continuation for optimization of interplanetary low-thrust trajectories // *Cosmic*

- Research.* 2012. Vol. 50. No. 3. P. 249–261. <https://doi.org/10.1134/S0010952512030069> EDN: HWNTUM
7. Baranov A.A., De Prado A.F.B., Razumny V.Y., Baranov Jr. Optimal low-thrust transfers between close near-circular coplanar orbits // *Cosmic Research.* 2011. Vol. 49. No. 3. P. 269–279. <https://doi.org/10.1134/S0010952511030014> EDN: OHRJVL
8. Ulybyshev Yu.P. Optimization of Multi-Mode Rendezvous Trajectories with Constraints. *Cosmic Research.* 2008. Vol. 46. No. 2. P. 133–145. <https://doi.org/10.1134/S0010952508020056> EDN: LLKRDR
9. Baranov A.A., Olivio A.P. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine // *RUDN Journal of Engineering Research.* 2023. Vol. 23. No. 4. P. 283–292. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-283-292> EDN: VBVJJK
10. Baranov A.A., Roldugin D.S. Six-impulse maneuvers for rendezvous of spacecraft in near-circular noncoplanar orbits // *Cosmic Research.* 2012. Vol. 50. No. 6. P. 441–448. <http://doi.org/10.1134/S0010952512050012> EDN: RGNPGR
11. Prussing J.E. Optimal two- and three-impulse fixed-time rendezvous in the vicinity of a circular orbit. *AIAA Journal.* 1970. Vol. 8. No. 7. P. 46–56. <https://doi.org/10.2514/3.5876>
12. Marec J.P. *Optimal Space Trajectories.* Studies in Astronautics; Vol.1. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Sci. Publ.; 1979.
13. Булыгин Ю.Л. Баллистическое обеспечение управления орбитальным движением геостационарных КА на различных этапах эксплуатации // 13 Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация», тезисы докладов. Крым, Евпатория, 29 июня — 6 июля, 2008. С. 73–74.
14. Рулов Ю.П. Управление космическим аппаратом, входящим в спутниковую систему при помощи электроракетных двигателей // *Космические системы.* 1985. № 23 (5). С. 691–700.
15. Кулаков А.Ю. Модель и алгоритмы реконфигурации системы управления движением космического аппарата: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург. 2017. 156 с.
16. Ткаченко И.С. Анализ ключевых технологий создания многоспутниковых орбитальных группировок малых космических аппаратов // *Онтология проектирования.* 2021. Т. 11. № 4 (42). С. 478–499. <http://doi.org/10.18287/2223-9537-2021-11-4-478-499> EDN: SGVMYK
17. Бажинов И.К., Гаврилов В.П., Ястребов В.Д. и др. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6-Союз-Прогресс». Москва : Наука, 1985. 377 с.
18. Baranov A.A. Algorithm for calculating the parameters of four-impulse transitions between close al-most-circular orbits. *Cosmic Research.* 1986;24(3):324–327.

19. *Lidov M.L.* Mathematical analogy between some optimal problems of trajectory corrections and selection of measurements and algorithms of their solution // *Cosmic Res.* 1971;5:687–706.
20. *Gavrilov V., Obukhov E.* Correction problem with fixed number of impulses // *Cosmic Res.*, 1980;2:163–172.
21. *Lyon P.M., Handelsman M.* Базис-вектор для импульсных траекторий с заданным временем перелёта // *Rocketry and Cosmonautics*. 1968. 6 (1). С. 153–160.
22. *Брагазин А.Ф., Усков А.В.* Перелеты со встречей продолжительностью не более витка между близкими околокруговыми компланарными орбитами // *Космическая техника и технологии*. 2020. № 3 (30). С. 82–93. <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-82-93> EDN: DTVFZH
23. *Clohesy W.H., Wiltshire R.S.* Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous // *Journal of the Aero-space Sciences*. 1960. Vol. 27. No. 9. P. 653–678. <https://doi.org/10.2514/8.8704>
24. *Hill G.W.* Researches in Lunar Theory // *American Journal of Mathematics*. 1878. Vol. 1, No. 1. P. 5–26. <https://doi.org/10.2307/2369430>
25. *Эльясберг П.Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. Москва : Наука, 1965. 540 с.
26. *Edelbaum T.N.* Minimum Impulse Transfer in the Vicinity of a Circular Orbit // *Journal of the Astronautical Sciences*. 1967. Vol. XIV. No. 2. P. 66–73.
27. *Оливио А.П.* Компланарная встреча двух космических аппаратов на околокруговой орбите с применением двигателя малой тяги // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 4 (142). С. 1–10. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.155> EDN: TPM DHL

About the authors

Andrey A. Baranov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Institute for Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, 4, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6606-3690, ORCID: 0000-0003-1823-9354; e-mail: andrey_baranov@list.ru

Adilson P. Olivio, Postgraduate of Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5632-3747; e-mail: pedrokekule@mail.ru

Сведения об авторах

Баранов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук, Российская Федерация, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 6606-3690, ORCID: 0000-0003-1823-9354; e-mail: andrey_baranov@list.ru

Оливио Адилсон Педро, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-5632-3747; e-mail: pedrokekule@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-127-134

EDN: LHUQMC

Research article / Научная статья

Analytical Review of the Common Failures of Satellite Structures: Causes, Effects, and Mitigation Strategies

Kazem Reza Kashyzadeh^{ID}✉, Sergei A. Kupreev^{ID}, Oleg E. Samusenko^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

Article history

Received: January 17, 2025

Revised: March 15, 2025

Accepted: March 27, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. Satellite structures are subjected to extreme conditions throughout their operational lifespan, including high launch loads, thermal cycling, and space debris impacts, making them vulnerable to structural failures. Understanding the causes, effects, and mitigation strategies for such failures is crucial for enhancing satellite reliability and mission success. This review critically examines the common structural failures in satellites, categorizing them by affected components such as primary frames, joints, thermal shielding, and deployable mechanisms. The study employs a comprehensive analysis of historical and recent failures, integrating insights from case studies, experimental research, and advancements in materials science and structural health monitoring. The findings highlight key failure mechanisms, including material fatigue, vibrational stresses, and thermal degradation, and assess innovative solutions such as smart materials and in-orbit repair techniques. By synthesizing current research and industry practices, this review provides a systematic understanding of failure trends and proposes future directions for improving satellite structural resilience. The insights presented in this study aim to support the development of more robust satellite architectures, ultimately contributing to safer and more reliable space missions.

Keywords: structural failures, failure mechanisms, materials science, health monitoring, risk mitigation strategies

Authors' contribution

Reza Kashyzadeh K. — introduction, general overview, section 3, 5, 6, and conclusion, writing the text; *Kupreev S.A., Samusenko O.E.* — analysis and scientific study of materials, section 2, 3 and 4.

Data availability statement

The datasets can be made available upon request.

For citation

Reza Kashyzadeh K, Kupreev SA, Samusenko OE. Analytical review on the common failures of satellite structures: causes, effects, and mitigation strategies. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):127–134. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-127-134>



Аналитический обзор распространенных отказов спутниковых конструкций: причины, последствия и стратегии смягчения последствий

К. Реза Каши Заде[✉], С.А. Купреев^{ip}, О.Е. Самусенко^{ip}

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 января 2025 г.

Доработана: 15 марта 2025 г.

Принята к публикации: 27 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Спутниковые конструкции подвергаются экстремальным условиям на протяжении всего срока их эксплуатации, включая высокие нагрузки при запуске, тепловые циклы и удары космического мусора, что делает их уязвимыми к структурным отказам. Понимание причин, последствий и стратегий снижения риска таких отказов имеет решающее значение для повышения надежности спутников и успешности миссий. В данном обзоре критически рассматриваются распространенные структурные отказы спутников, классифицируемые по пораженным компонентам, таким как основные каркасы, соединения, тепловая защита и разворачиваемые механизмы. В исследовании проводится всесторонний анализ исторических и современных отказов с интеграцией данных из тематических исследований, экспериментальных исследований, а также достижений в области материаловедения и мониторинга структурной целостности. Полученные результаты выявляют основные механизмы отказов, включая усталость материалов, вибрационные нагрузки и тепловую деградацию, а также дают оценку инновационным решениям, таким как умные материалы и технологии ремонта на орбите. Обобщая современные исследования и практики отрасли, авторы систематизируют тенденции отказов и предлагают перспективные направления для повышения устойчивости спутниковых конструкций. Результаты исследования направлены на развитие более надежных спутниковых архитектур, что в конечном итоге способствует повышению безопасности и эффективности космических миссий.

Ключевые слова: структурные отказы, механизмы отказа, материаловедение, мониторинг состояния, стратегии снижения рисков

Вклад авторов

Реза Каши Заде К. — введение, общий обзор, раздел 3, 5, 6, и заключение, написание текста; Купреев С.А., Самусенко О.Е. — анализ и научная проработка материалов, раздел 2, 3 и 4.

Заявление о доступности данных

Данные могут быть предоставлены по запросу.

Для цитирования

Reza Kashyzadeh K., Kupreev S.A., Samusenko O.E. Analytical review of the common failures of satellite structures: causes, effects, and mitigation strategies // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 127–134. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-127-134>

Introduction

The need for durable and reliable satellite structures has grown significantly with the rise of commercial space initiatives, Earth observation missions, and space exploration programs [1]. Satellites must be engineered to withstand a wide

range of mechanical, thermal, and environmental stresses both during launch and in orbit [2]. Despite advancements, structural failures continue to be a major risk, often resulting in reduced functionality or mission loss. This study provides a comprehensive overview of common failure modes in satellite structures and examines their

causes, effects, and mitigation strategies. This review synthesizes the findings from both industry and academia, focusing on failure mechanisms and design approaches that enhance the robustness of satellite structures.

1. Overview of Satellite Structural Components

Satellite structures include primary and secondary elements, each tailored for specific roles and designed to withstand unique stresses [3; 4]. The key structural components include the following:

Primary Frame (PF): This part provides the fundamental rigidity and load-bearing structure for the satellite [3].

Secondary Structures (SS): These support critical subsystems such as thermal control, propulsion, and payload interfaces.

Deployable Mechanisms (DM): This includes solar panels, antennas, and other extendable elements that activate post-launch.

Thermal Shielding and Insulation (TSI): Layers designed to manage extreme temperature changes.

Each of these components has distinct design requirements and associated failure risks owing to the environmental and operational factors. Figure 1 shows the satellite structural components with personal wireless communications [5].

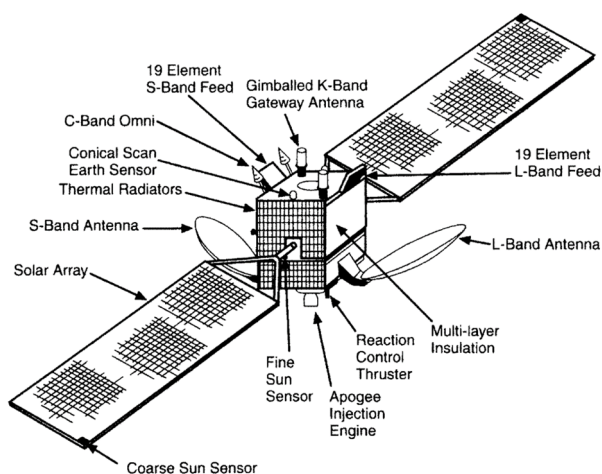


Figure 1. Diagram of satellite structural components
Source: made by R. Perez [5]

2. Common Causes of Structural Failures in Satellites

2.1. Vibrational and Acoustic Loads During Launch

The launch phase subjects satellites to high levels of vibration and acoustic energy [6–8]. These forces often lead to structural fatigue and even catastrophic failure in sensitive areas such as joints and fasteners [9; 10]. Research has shown that vibrational frequencies experienced during launch can amplify stresses in weak points of the satellite structure, leading to fractures and detachment. Figure 2 demonstrates the vibration and acoustic testing of the JUPITER 3 satellite [11].

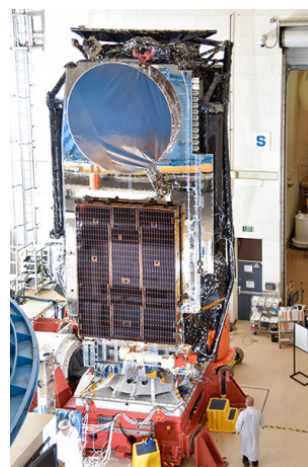


Figure 2. The vibration and acoustic testing on the JUPITER 3 satellite

Source: by Hughes. Available from:
<https://www.hughes.com/resources/insights/inside-hughes/theres-whole-lot-shakin-going-jupiter-3-undergoes-vibration-and>
(accessed: 18.03.2025)

2.2. Thermal Stresses Due to Orbital Environment

Satellites are exposed to extreme thermal cycling between the sunlit and shaded sides of the Earth, causing materials to expand and contract repeatedly [11; 12]. Thermal cycling can degrade composite materials, lead to adhesive breakdown, and create microcracks in metals and polymers [13], particularly in Low Earth Orbit (LEO) [14; 15]. A schematic of the thermal exchange between a space-craft and the space environment is provided below [16], (Figure 3).

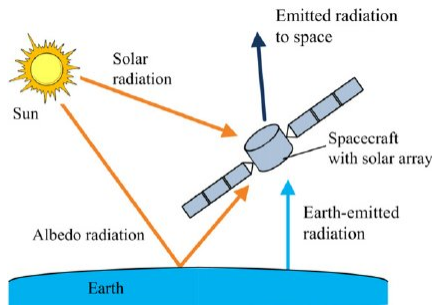


Figure 3. Thermal exchange between spacecraft (solar array) and space environment

Source: by J. Li, S. Yan, R. Cai [16]

2.3. Radiation-Induced Degradation

Radiation from solar and cosmic sources causes material degradation, leading to embrittlement and reduced structural integrity over time [17; 18]. Studies on polymer degradation and metal embrittlement indicate that radiation exposure significantly shortens the lifespan of structural materials used in satellite construction [19; 20].

2.4. Micrometeoroid and Orbital Debris Impacts

Micrometeoroids and space debris represent constant hazards in orbit, especially in LEO [21; 22]. Even small impacts can lead to pitting and localized structural damage, compromising shielding and initiating fatigue. Figure 4 shows the front and rear sides of the impact feature on a solar array [23]. In this figure, the diameter of the opening on both sides is approximately 5 mm, whereas the central hole has a diameter of 0.5 mm.

2.5. Manufacturing and Assembly Anomalies

Manufacturing inconsistencies and assembly errors contribute to structural vulnerabilities. Defects in welding, material inconsistency, and improper alignment can manifest as significant structural issues during the operational lifetime of satellites [24; 25].

3. Types of Structural Failures in Satellite Components

3.1. Frame and Panel Failures

The frame and panels form the primary load-bearing structure of a satellite. Failure modes include:

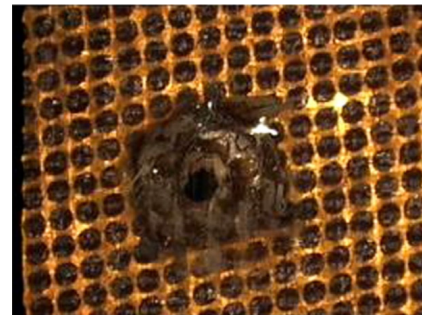
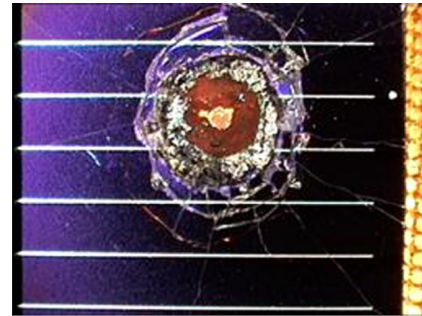


Figure 4. Front and rear sides of impact feature on HST solar array

Source: by G. Drolshagen [23]

- ◆ *Buckling and Cracking:* Occurring under high mechanical loads, especially during launch [26; 27].

- ◆ *Corrosion:* In LEO, exposure to atomic oxygen causes the surface degradation of metal and polymer-based components [28–30].

3.2. Joint and Fastener Failures

Joints and fasteners play a crucial role in maintaining structural integrity [31]. Common failures include the following:

- ◆ *Thermal expansion discrepancies:* Caused by different expansion rates in dissimilar materials, which can weaken the joints over time.

- ◆ *Cold welding:* In a vacuum environment, metals can bond unintentionally, leading to potential joint failures.

3.3. Deployable Mechanism Failures

Deployable structures such as solar arrays and antennas face unique challenges:

- ◆ *Stuck deployments:* Due to binding from debris or thermal distortions.

- ◆ *Spring and hinge fatigue:* Resulting from thermal cycling leading to impaired deployment capabilities.

3.4. Thermal Shielding and Insulation Failures

Thermal management systems are crucial for satellite operation. Failure modes include:

- ◆ *Insulation degradation*: Particularly for multi-layer insulation exposed to prolonged radiation [32; 33].
- ◆ *Micro-Cracking*: In thermal layers due to extreme expansion and contraction.

4. Case Studies of Structural Failures in Satellite Missions

4.1. ISS Solar Array Deployment Anomaly

The 2007 tear in the ISS solar array was attributed to fatigue in the deployment mechanism [34]. This case highlighted the importance of material durability in deployable structures and led to the integration of stronger and more resilient materials in later designs.

4.2. Envisat Gyroscope Mount Failure

The Envisat mission experienced a gyroscope mount failure, largely due to an under-designed mounting bracket. This case demonstrated the need for robust mounting mechanisms for sensitive instrumentation.

4.3. Orbcomm-1 Series Vibration Damage

The Orbcomm-1 satellites suffered structural damage owing to insufficient vibrational damping during launch. Since then, enhancements in damping mechanisms have been implemented to mitigate similar risks.

5. Mitigation Strategies and Emerging Technologies

5.1. Advanced Materials and Coatings

In this particular application, research into advanced composites and coatings aims to increase resistance to radiation and thermal cycling:

- ◆ *Carbon Fiber Composites (CFC)*: This type of composite is used for primary structures owing to its strength-to-weight ratio [35].
- ◆ *Radiation-Resistant Polymers (RRP)*: They are used to prevent embrittlement and maintain material integrity over extended missions [36–38].

5.2. Enhanced Testing and Simulation Techniques

It is imperative that vibrational and thermal testing be conducted under realistic conditions:

- ◆ *Accelerated Thermal Cycling Tests (ATCT)*: It simulates orbital conditions to predict long-term material performance [39].
- ◆ *Finite Element Analysis (FEA)*: It helps anticipate the points of failure under various load scenarios [40–44].

5.3. Real-Time Structural Health Monitoring

Incorporating sensors and diagnostic tools allows for real-time monitoring:

- ◆ *Embedded strain gauges*: These are generally used to detect stress points and initiate predictive maintenance.
- ◆ *Sensor-Based predictive maintenance*: Data-driven models use health monitoring to proactively schedule maintenance or adjustments [45; 46].

5.4. Reinforcement of Joints And Fasteners

Material selection and thermal compatibility improvements enhance joint performance:

- ◆ *Thermally compatible alloys*: It prevents cold welding and differential expansion in joints.
- ◆ *Improved fastener designs*: These were developed to resist both vibrational and thermal cycling stresses.

6. Future Directions in Satellite Structural Design

Emerging research in adaptive structures and self-healing materials shows promise for reducing the impact of micrometeorite damage and thermal stress. Additionally, AI-driven simulations and autonomous health-monitoring systems are expected to play a pivotal role in satellite design, enabling smarter and more resilient structures for long-term missions.

Conclusion

This study critically examined the common structural failures in satellite systems, focusing on their causes, effects, and mitigation strategies.

The research employed a comprehensive review of historical and recent satellite failures, integrating case studies, experimental findings, and advancements in materials science and structural health monitoring.

Through this analysis, we systematically investigated the key structural failure modes, including vibrational stresses during launch, thermal cycling effects in orbit, radiation-induced degradation, and micrometeoroid impacts. The study further evaluated failure-prone components, such as primary frames, joints, thermal shielding, and deployable mechanisms.

The findings highlight several advancements that can enhance satellite resilience. Notably, the adoption of carbon fiber composites, radiation-resistant polymers, and thermally compatible alloys has shown promise in mitigating structural degradation. Additionally, enhanced testing techniques, real-time structural health monitoring, and improved fastener designs have contributed to reducing failure risks.

By synthesizing current knowledge and emerging technologies, this study provides valuable insights for the development of more robust satellite structures. The proposed advancements aim to enhance the reliability and longevity of space missions and ensure improved performance under extreme environmental conditions.

References

1. Gu X, Tong X. Overview of China Earth Observation Satellite Programs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2015;3(3):113–129. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2015.2467172>
2. Maddock CA, Ricciardi LA, West M, West J, Kontis K, Rengarajan S, Evans DJA, Milne A, McIntyre S. Conceptual design analysis for a two-stage-to-orbit semi-reusable launch system for small satellites. *Acta Astronautica*. 2018;152:782–792. <https://doi.org/10.1016/J.AC TAASTRO.2018.08.021>
3. Thaheer ASM, Ismail NA, Amir MHH, Razak NA. Static and dynamic analysis of different MYSat frame structure. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2024;10261–10278. <http://doi.org/10.15282/jmes.18.4.2024.4.0810>
4. Abdelal GF, Abulfoutouh N, Gad AH. *Finite element analysis for satellite structures: applications to their design, manufacture and testing*. London: Springer Publ; 2013. <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4637-7>
5. Perez R. Introduction to satellite systems and personal wireless communications. *Wireless communications design handbook*. 1998;1:1–30. ISBN: 9780123995957
6. Warnakulasuriya HS. Vibration Analysis and Testing of a Satellite Structure during its Launch and In-flight Stages. *Doctoral dissertation, Politecnico di Torino*. 2021. Available from: <https://webthesis.biblio.polito.it/20111/> (accessed: 10.12.2024).
7. Jha R, Pausley M, Ahmadi G. Optimal active control of launch vibrations of space structures. *Journal of spacecraft and rockets*. 2003;40(6):868–874. <https://doi.org/10.2514/2.7051>
8. Ando S, Shi Q. Prediction of Acoustically Induced Random Vibration Response of Satellite Equipments with Proposed Asymptotic Apparent Mass. *Journal of Space Engineering*. 2008;1(1):12–21. <https://doi.org/10.1299/spacee.1.12>
9. Doyle D, Zagrai A, Arritt B, Cakan H. Damage detection in satellite bolted joints. *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. 2008;43321:209–218. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2008-550>
10. Doyle D, Zagrai A, Arritt B, Çakan H. Damage detection in bolted space structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2010;21(3):251–264. <https://doi.org/10.1177/1045389X09354785>
11. Kumar Y. The Environmental and EMI Testing for Satellites. *Space Navigators*. 2023. Available from: <https://www.spacenavigators.com/post/the-environmental-and-emi-testing-for-satellites> (accessed: 10.12.2024).
12. Asdaghpour F, Sadeghikia F, Farsi MA. Thermal Effects of the Space Environment on the Radiation Characteristics of a Reflector Antenna in LEO Satellite. *Journal of Space Science and Technology*. 2022;15(2):103–113. EDN: PGPIGY
13. Esha N, Hausmann J. Material Characterization Required for Designing Satellites from Fiber-Reinforced Polymers. *Journal of Composites Science*. 2023;7(12):515. <https://doi.org/10.3390/jcs7120515> EDN: XRUMIJ
14. Naebe M, Abolhasani MM, Khayyam H, Amini A, Fox B. Crack damage in polymers and composites: a review. *Polymer Reviews*. 2016;56(1):31–69. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1078352>
15. Grossman E, Gouzman I. Space environment effects on polymers in low earth orbit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003;208:48–57. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00640-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00640-2) EDN: KIRTZF
16. Li J, Yan S, Cai R. Thermal analysis of composite solar array subjected to space heat flux. *Aerospace Science and Technology*. 2013;27(1):84–94. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2012.06.010>

17. Teichman LA. NASA/SDIO Space Environmental Effects on Materials Workshop: part 1. National aeronautics and space administration hampton va langley research center. *Defense Technical Information Center*. 1989. Available from: https://archive.org/details/DTIC_ADA351614 (accessed: 10.12.2024).
18. Toto E, Lambertini L, Laurenzi S, Santonicola MG. Recent Advances and Challenges in Polymer-Based Materials for Space Radiation Shielding. *Polymers*. 2024;16(3):382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382> EDN: OVUUM
19. Lopez-Calle I, Franco AI. Comparison of cubesat and microsat catastrophic failures in function of radiation and debris impact risk. *Scientific Reports*. 2023;13(1):385. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27327-z> EDN: EGSBHE
20. Bedingfield KL, Leach RD. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. *National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center*. 1996. Available from: https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_19960050463 (accessed: 10.12.2024).
21. de Groh KK, Banks BA, Miller SKR, Dever JA. Degradation of spacecraft materials. In: *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2018:601–645. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00029-0>
22. Dever J, Banks B, de Groh K, Miller S. Degradation of spacecraft materials. In: *Handbook of environmental degradation of materials*. 2005:465–501. <https://doi.org/10.1016/B978-081551500-5.50025-2> EDN: YYRJPZ
23. Drolshagen G. Impact effects from small size meteoroids and space debris. *Advances in space Research*. 2008;41(7):1123–1131. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.007>
24. Xiong L, Chuang AC, Thomas J, Prost T, White E, Anderson I, Singh D. Defect and satellite characteristics of additive manufacturing metal powders. *Advanced Powder Technology*. 2022;33(3):103486. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103486> EDN: SKXKYQ
25. Arsic M, Aleksic V, Andelkovic Z. Theoretical and experimental analysis of welded structure supporting satellite planetary gear. *Struktural Integrity and Life-Integritet I Vek Konstrukcija*. 2007;7(1):5–12. Available from: <http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/pdf/005-IVK1-2007-MA-VA-ZA.pdf> (accessed: 10.12.2024).
26. Reda R, Ahmed Y, Magdy I, Nabil H, Khamis M, Refaey A, et al. Basic principles and mechanical considerations of satellites: a short review. *Transactions of the Institute of Aviation*. 2023;272(3):40–54. <https://doi.org/10.2478/tar-2023-0016> EDN: RZFYAO
27. Lee K, Han S, Hong JW. Post-buckling analysis of space frames using concept of hybrid arc-length methods. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2014;58:76–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2013.09.003>
28. Goto A, Yukumatsu K, Tsuchiya Y, Miyazaki E, Kimoto, Y. Changes in optical properties of polymeric materials due to atomic oxygen in very low Earth orbit. *Acta Astronautica*. 2023;212:70–83. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.036> EDN: UVJUGP
29. Banks BA, Miller SKR, de Groh KK, Demko R. Atomic oxygen effects on spacecraft materials. In: *Ninth International Symposium on Materials in a Space Environment* (No. NASA/TM-2003-212484). 2003. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030062195/downloads/20030062195.pdf> (accessed: 10.12.2024).
30. Allegri G, Corradi S, Marchetti M, Milinchuck V. Atomic oxygen degradation of polymeric thin films in low Earth orbit. *AIAA Journal*. 2003;41(8):1525–1534. <https://doi.org/10.2514/2.2103> EDN: LIBZWH
31. Wnuk MP. Structural integrity of bonded joints. *Physical Mesomechanics*. 2020;13(5-6):255–267. <https://doi.org/10.1016/j.physme.2010.11.006> EDN: XZJCKO
32. Bhandari P. Effective Solar Absorptance of Multi-layer Insulation. *SAE International Journal of Aerospace*. 2009; 4(1):210–218. <http://doi.org/10.4271/2009-01-2392>
33. Tachikawa S, Nagano H, Ohnishi A, Nagasaka Y. Advanced passive thermal control materials and devices for spacecraft: a review. *International Journal of Thermophysics*. 2022;43(6):91. <http://doi.org/10.1007/s10765-022-03010-3>
34. Van Wagenen R. The ISS Engineering Feat: Solar Array Repair. *ISS National Laboratory Center for the Advancement of Science in Space*. 2020. Available from: <https://issnationallab.org/education/the-iss-engineering-feat-solar-array-repair> (accessed: 10.12.2024).
35. Tredway WK, McCluskey PH, Prew KM. Carbon fiber reinforced glass matrix composites for satellite applications. *Contract N00014-89-C-0046*. 1992;14(89-C):0046. Available from: https://archive.org/details/DTIC_ADA253018 (accessed: 10.12.2024).
36. El-Hameed AM. Radiation effects on composite materials used in space systems: a review. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2022;11(1):313–324. <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2079902> EDN: XRARLO
37. Toto E, Lambertini L, Laurenzi S, Santonicola MG. Recent Advances and Challenges in Polymer-Based Materials for Space Radiation Shielding. *Polymers*. 2024;16(3):382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382> EDN: OVUUM
38. Taylor EW, Nichter JE, Nash F, Hash F, Szep AA, Michalak RJ, et al. Radiation-resistant polymer-based photonics for space applications. In: *Photonics for Space Environments IX*. 2004;5554:15–22. <http://doi.org/10.1117/12.556659>
39. Yu Z, Ren Z, Tao J, Chen X. A reliability assessment method based on an accelerated testing under thermal cycling environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2014; 229(2):97–104. <https://doi.org/10.1177/1748006X14558132>
40. Kashyzadeh KR, Farrahi GH, Shariyat M, Ahmadian MT. Experimental accuracy assessment of various high-cycle fatigue criteria for a critical component with a complicated geometry and multi-input random non-pro-

portional 3D stress components. *Engineering Failure Analysis*. 2018;90:534–553. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.033>

41. Abdollahnia H, Elizei AMH, Kashyzadeh KR. Multiaxial fatigue life assessment of integral concrete bridge with a real-scale and complicated geometry due to the simultaneous effects of temperature variations and sea waves clash. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(12):1433. <https://doi.org/10.3390/jmse9121433> EDN: MPPSSO

42. Kashyzadeh KR. Effects of axial and multiaxial variable amplitude loading conditions on the fatigue life assessment of automotive steering knuckle. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020;20(2):455–463. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00841-w> EDN: JNNWPQ

43. Kashyzadeh KR, Sourì K, Bayat AG, Jabalbarez RS, Ahmad M. Fatigue life analysis of automotive cast

iron knuckle under constant and variable amplitude loading conditions. *Applied Mechanics*. 2022;3(2):517–532. <https://doi.org/10.3390/applmech3020030> EDN: FTQZWL

44. Kashyzadeh KR. Failure Strength of Automotive Steering Knuckle Made of Metal Matrix Composite. *Applied Mechanics*. 2023;4(1):210–229. <https://doi.org/10.3390/applmech4010012> EDN: JXAPJY

45. Hermansa M, Kozielski M, Michalak M, Szczyrba K, Wróbel Ł, Sikora M. Sensor-based predictive maintenance with reduction of false alarms — A case study in heavy industry. *Sensors*. 2021;22(1):226. <https://doi.org/10.3390/s22010226> EDN: XCJHHK

46. Kaiser KA, Gebraeel NZ. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*. 2009;39(4):840–849. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2016429>

About the authors

Kazem Reza Kashyzadeh, Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Equipment and Technology, 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

Sergei A. Kupreev, Doctor of Sciences (Techn.), 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: 2287-2902, ORCID: 0000-0002-8657-2282; e-mail: kupreev-sa@rudn.ru

Oleg E. Samusenko, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152, ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@rudn.ru

Сведения об авторах

Ре́за Каши́ 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

Ку́преев Серге́й Алексе́евич, доктор технических наук, профессор кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902, ORCID: 0000-0002-8657-2282; e-mail: kupreev-sa@rudn.ru

Саму́сенко Оле́г Евге́ньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152, ORCID: 0000-0002-8350-9384; e-mail: samusenko@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143

EDN: LJDNQI

Научная статья / Research article

Угловая стабилизация мультироторного летательного аппарата в атмосфере Венеры

В.В. Рыжков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

✉ dinozavr.ru@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 7 января 2025 г.

Доработана: 7 февраля 2025 г.

Принята к публикации: 1 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрена проблема стабилизации углового положения МРЛА (мультироторного летательного аппарата) для исследования атмосферы Венеры. Актуальность темы обусловлена необходимостью получения детальных данных о нижних слоях венерианской атмосферы, что важно для понимания климатических процессов в Солнечной системе в целом. Цель исследования — разработка системы управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для обеспечения устойчивости и маневренности МРЛА в условиях турбулентной атмосферы Венеры. В исследовании проведено математическое моделирование углового движения МРЛА с учетом аэродинамических воздействий и ветровых возмущений. Для стабилизации ориентации аппарата использован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, параметры которого оптимизировались методом Нелдера — Мида с применением численного интегрирования уравнений движения. В результате разработана система дифференциальных уравнений, описывающая динамику углового движения МРЛА. Проведена автоматизация подбора коэффициентов регулятора, обеспечивающая минимизацию отклонений ориентации аппарата при воздействии случайных ветровых возмущений. Численное моделирование подтвердило эффективность предложенного алгоритма стабилизации. Предложенный подход к автоматизированному подбору параметров пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора позволяет минимизировать интегральную ошибку ориентации и улучшить динамические характеристики системы управления летательного аппарата мультикоптерного типа. Разработанный алгоритм стабилизации может быть использован для управления летательными аппаратами в сложных атмосферных условиях, включая сильные возмущения, характерные для облачного слоя Венеры.

Ключевые слова: динамика полета, регулирование ориентации, ветровые возмущения, ПИД-регулятор, математическое моделирование, атмосферные возмущения, автоматизация подбора параметров

Для цитирования

Рыжков В.В. Угловая стабилизация мультироторного летательного аппарата в атмосфере Венеры // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 135–143. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143>

© Рыжков В.В., 2025



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

Angular Stabilization of a Multirotor Aircraft in Venus' Atmosphere

Vladislav V. Ryzhkov 

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

✉ dinozavr.ru@mail.ru

Article history

Received: January 7, 2025

Revised: February 7, 2025

Accepted: March 1, 2025

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. The study addresses the problem of attitude stabilization of a multirotor aircraft (MRAC) designed for exploring the atmosphere of Venus. The relevance of this topic is driven by the need to obtain detailed data on the lower layers of Venus' atmosphere, which is crucial for understanding climate processes in the Solar System as a whole. The objective of the study is to develop a control system based on a proportional-integral-derivative controller to ensure stability and maneuverability of the MRAC under turbulent atmospheric conditions on Venus. The research includes mathematical modeling of the angular motion of the MRAC, taking into account aerodynamic forces and wind disturbances. A PID controller is used for attitude stabilization, with its parameters optimized using the Nelder-Mead method in combination with numerical integration of the equations of motion. As a result, a system of differential equations describing the angular dynamics of the MRLA has been developed. An automated tuning approach for the controller coefficients is implemented to minimize orientation deviations under random wind disturbances. Numerical simulations confirm the effectiveness of the proposed stabilization algorithm. The suggested approach to automated PID parameter tuning minimizes the integral orientation error and improves the dynamic performance of the multirotor flight control system. The developed stabilization algorithm can be applied to aerial vehicles operating in complex atmospheric conditions, including strong disturbances typical of the Venus cloud layer.

Keywords: flight dynamics, orientation control, wind disturbances, PID controller, mathematical modeling, atmospheric disturbances, automated parameter tuning

For citation

Ryzhkov VV. Angular stabilization of a multirotor aircraft in Venus' atmosphere. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):135–143. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-135-143>

Введение

Исследование атмосферы Венеры имеет большое значение для понимания климатических процессов в масштабах Солнечной системы. Плотная углекислотная атмосфера, экстремальные температуры и мощный парниковый эффект делают ее уникальным объектом изучения, позволяя выявлять закономерности, применимые и к Земле. Орбитальные аппараты обеспечивают общий обзор, но не дают детальных данных о нижних слоях, а спускаемые зонды позволяют получить локальные данные, но их возможности ограничены из-за экстремальных условий среды (рис. 1) [1; 2].

Перспективным решением является использование мультироторного летательного аппарата (МРЛА), способного длительно функцио-

нировать в облачном слое Венеры на высотах 50–55 км, где условия относительно благоприятны. Высокая маневренность и устойчивость к турбулентности делают МРЛА эффективным инструментом для исследования динамики атмосферы [3; 4].

Настоящая работа посвящена анализу углового движения такого аппарата с учетом аэродинамических воздействий и ветровых возмущений. Разрабатывается система управления на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), параметры которого оптимизируются для повышения устойчивости [5; 6].

Объектом исследования является МРЛА, предметом — его динамика в условиях венерианской атмосферы. Полученные результаты

позволят улучшить управление летательными платформами и создать более эффективные автономные системы для изучения планетарных атмосфер.

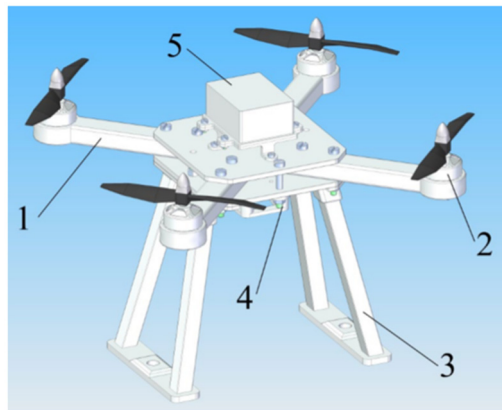


Рис. 1. Модель МРЛА:

1 — балка винтомоторной группы;
2 — винтомоторная группа; 3 — шасси; 4 — адаптер крепления полезной нагрузки; 5 — приборный отсек
Источник: выполнено В.В. Рыжковым, М.Ю. Яценко [3]

Figure 1. MRLA model:

1 — beam of the propulsion group;
2 — propulsion group; 3 — landing gear;
4 — payload mounting adapter; 5 — avionics compartment
Source: by V.V. Ryzhkov, M.Yu. Yatsenko [3]

1. Цель и постановка задачи

Цель исследования — строгое математическое описание задачи, включающее формулировку уравнений движения, разработку алгоритма управления и учет случайных атмосферных возмущений. Также необходимо представить численный метод решения с применением алгоритмов численного интегрирования. Для стабилизации ориентации летательного аппарата используется ПИД-регулятор, причем его параметры подбираются автоматически [5]. Это позволяет повысить эффективность управления и снизить влияние субъективных настроек.

В настоящем исследовании рассматривается задача стабилизации углового положения МРЛА, функционирующего на высоте около 50 км в облачном слое атмосферы Венеры.

В математическом представлении система описывается вектором, который включает в себя три переменные, характеризующие пространственную ориентацию (углы крена, тангажа и

рыскания), а также три значения угловых скоростей относительно корпуса аппарата. Динамика этих параметров подчиняется уравнениям движения, в которых учитываются как управляющие воздействия со стороны ПИД-регулятора, так и внешние аэродинамические моменты, вызванные атмосферными потоками.

Механизм управления основан на принципе корректировки углов аппарата относительно заданных целевых значений. Реализация осуществляется через вычисление управляющих моментов, зависящих от текущих отклонений ориентации и их производных. Атмосферные возмущения проявляются через случайные изменения скорости воздушного потока, что приводит к дополнительным аэродинамическим моментам, действующим на аппарат.

Задача управления заключается в том, чтобы минимизировать отклонения ориентации и угловых скоростей за определенный промежуток времени. Для этого используется специальный критерий качества, который учитывает суммарные ошибки в ориентации и скорости вращения. Поиск оптимальных параметров регулятора выполняется методом последовательной корректировки управляющих коэффициентов, при этом каждый шаг сопровождается пересчетом движения аппарата с помощью численного решения уравнений.

Вся система описывает процесс эволюции ориентации аппарата во времени под воздействием как системы управления, так и случайных возмущений ветра. Главная цель — подобрать такие параметры ПИД-регулятора, при которых отклонения ориентации и угловых скоростей будут сведены к минимуму, обеспечивая устойчивое и быстрое восстановление ориентации в условиях турбулентности атмосферы Венеры.

2. Математическая модель углового движения мультироторного летательного аппарата

Угловое движение МРЛА подчиняется уравнениям Эйлера, описывающим динамику твердого тела. В данном случае ориентация аппа-

рата определяется тремя углами: крена, тангажа и рыскания φ, θ, ψ . Угловые скорости рассматриваются в системе координат, связанной с корпусом аппарата, и представляют собой три компоненты, соответствующие вращению вокруг каждой из осей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x &= M_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z; \\ J_y \dot{\omega}_y &= M_y - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x; \\ J_z \dot{\omega}_z &= M_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_x, M_y, M_z — суммарные моменты летательного аппарата относительно его осей.

Динамика вращательного движения формулируется через сумму моментов, действующих на аппарат. Эти моменты включают как управляющие воздействия, создаваемые системой управления, так и внешние возмущения, вызванные аэродинамическими эффектами, турбулентными потоками ветра:

$$\begin{aligned} M_x &= M_{ux} + M_{dx}; \\ M_y &= M_{uy} + M_{dy}; \\ M_z &= M_{uz} + M_{dz}. \end{aligned} \quad (2)$$

Изменение ориентации аппарата во времени описывается кинематическими соотношениями, которые выражают скорость изменения углов через компоненты угловой скорости. Стандартное представление с использованием углов Эйлера позволяет связать их с угловыми скоростями, обеспечивая полное математическое описание вращательного движения:

$$\begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi \sec \theta & \cos \varphi \sec \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Так формируется система дифференциальных уравнений, включающая шесть переменных состояния: три угла ориентации и три компоненты угловой скорости. Эта система определяет эволюцию углового движения аппарата под воздействием как управляющих, так и возмущающих факторов [7–10].

3. Разработка закона управления на основе ПИД-регулятора

Для удержания летательного аппарата (ЛА) в заданной ориентации необходимо сформировать управляющие моменты, компенсирующие отклонения от целевых значений углов крена, тангажа и рыскания. Для этого применяется пропорционально-интегрально-дифференциальный ПИД-регулятор, который отдельно регулирует каждую из координат углового движения.

Пропорциональная составляющая K_p управления отвечает за мгновенную реакцию на отклонение, стремясь вернуть аппарат в нужное положение. Дифференциальная K_d -компонента учитывает скорость изменения ошибки, что помогает сглаживать колебания и снижать перерегулирование. Интегральная часть K_i компенсирует накопленные ошибки, устраняя смещения, которые могли бы сохраняться при постоянных внешних возмущениях, таких как устойчивый ветер.

Эффективная работа регулятора определяется корректным подбором его коэффициентов K_p, K_i, K_d . Эти параметры могут настраиваться вручную методом проб и ошибок или подбираться с помощью численных и аналитических методов оптимизации. В частности, для их автоматизированного выбора применяется минимизация критериев качества, например, интеграла квадратичной ошибки, обеспечивающего быструю и точную стабилизацию ориентации.

Оптимальный набор коэффициентов определяется на основе заданного критерия качества управления, который отражает суммарную ошибку ориентации во времени. Для минимизации этого показателя используются численные методы оптимизации [5].

Ошибка ориентации для крена вычисляется как

$$e_\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi_{\text{зад}}. \quad (4)$$

Управляющее воздействие по оси крена формируется следующим образом:

$$M_{ux}(t) = -K_{p_x} e_\theta(t) - K_{i_x} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau - K_{d_x} \frac{de_\theta(t)}{dt}. \quad (5)$$

Аналогичные выражения используются для тангажа и рыскания:

$$\begin{cases} M_{uy}(t) = -K_{p_y} e_\theta(t) - K_{i_y} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau - K_{d_y} \frac{de_\theta(t)}{dt} \\ M_{uz}(t) = -K_{p_z} e_\psi(t) - K_{i_z} \int_0^t e_\psi(\tau) d\tau - K_{d_z} \frac{de_\psi(t)}{dt} \end{cases}, \quad (6)$$

где ошибки по тангажу и рысканию определяются как $e_\theta(t) = \theta(t) - \theta_{\text{зад}}$, $e_\psi(t) = \psi(t) - \psi_{\text{зад}}$.

4. Формирование общей системы дифференциальных уравнений для динамики мультироторного летательного аппарата

В сумме формируется система из шести обыкновенных дифференциальных уравнений, объединяющих динамику трех угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z и кинематику трех эйлеровых углов ϕ , θ , ψ . При дополнении этой системы уравнениями для накопления интегральной ошибки ПИД-регулятора получаем замкнутую математическую модель, позволяющую моделировать реакцию квадрокоптера на управляющие моменты и внешние возмущения ветра. Такая модель служит основой для численной реализации, в которой алгоритм ПИД-регулятора рассчитывает управляющие воздействия M_{ux} , M_{uy} , M_{uz} , а возмущающие моменты M_{dx} , M_{dy} , M_{dz} генерируются функциями аэродинамического возмущения с учетом случайных отклонений скорости ветра.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{M_x - (J_y - J_z)\omega_y \omega_z}{J_x} \\ \dot{\omega}_y = \frac{M_y - (J_z - J_x)\omega_z \omega_x}{J_y} \\ \dot{\omega}_z = \frac{M_z - (J_x - J_y)\omega_x \omega_y}{J_z} \\ \dot{\phi} = \omega_x + \omega_y \sin \phi \tan \theta + \omega_z \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} = \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi \\ \dot{\psi} = \omega_y \sin \phi \sec \theta + \omega_z \cos \phi \sec \theta \end{cases} \quad (7)$$

5. Оптимизация параметров ПИД-регулятора с использованием численных методов

Разработка программы ведется на языке Python с использованием библиотеки SciPy, что позволяет автоматизировать процесс подбора параметров ПИД-регулятора. Вначале формируется критерий качества

$$J(K) = \int_0^T (\varphi(t) - \varphi_{\text{зад}})^2 dt,$$

где K — вектор коэффициентов ПИД-регулятора. Этот функционал качества оценивает суммарное отклонение углов ориентации от заданных значений на всем промежутке времени. Затем для каждого набора коэффициентов регулятора выполняется численное интегрирование уравнений движения, причем в процессе расчета учитываются случайные внешние возмущения, например порывы ветра. После завершения интегрирования вычисляется значение критерия качества, отражающего степень расхождения реальной траектории от целевой. Дальнейшая оптимизация коэффициентов выполняется при помощи метода Нелдера — Мида, который позволяет найти такой набор параметров, при котором суммарная ошибка становится минимальной 9. В результате система автоматически находит оптимальные настройки ПИД-регулятора, обеспечивая эффективную стабилизацию ориентации летательного аппарата.

6. Моделирование возмущающих моментов, вызванных атмосферными потоками

Возмущающие моменты, действующие на летательный аппарат, возникают из-за неравномерного обтекания его корпуса воздушным потоком. Их величина зависит от плотности атмосферы, характерных размеров аппарата и относительной скорости потока. В модели приближенно используется выражение, в котором учитываются безразмерные коэффициенты аэродинамических моментов, динамическое давление и параметры конструкции.

Коэффициенты, определяющие влияние возмущений, подбираются оценочно, основываясь

на данных по аналогичным малым летательным аппаратам. Ветер в модели не рассматривается как строго постоянный, а его горизонтальная скорость включает случайную составляющую, равномерно распределенную в определенном интервале. Это приводит к изменению динамического давления на каждом шаге численного интегрирования и, соответственно, к случайным колебаниям возмущающих моментов [11–13].

Для упрощения принимается, что воздействие ветра одинаково по всем трем осям. На данном этапе моделирования цель заключается не в полном соответствии реальным условиям, а в оценке работы системы стабилизации при наличии случайных внешних воздействий.

Формулы, используемые в расчетах:

$$M_{d_i} = C_{m_i} q S L_{\text{char}}, \quad (8)$$

где $q = \frac{1}{2} \rho V_{\text{отн}}^2$ — динамическое давление, а C_{m_i} — аэродинамические коэффициенты моментов.

Горизонтальная скорость ветра моделируется как

$$V_{\text{гор. случ}} = V_{\text{гор}} + \Delta V, \quad (9)$$

где ΔV — случайная величина, имеющая равномерное распределение в диапазоне от -30 до $+30$ м/с.

7. Численный метод решения уравнений движения

Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику летательного аппарата, применяется стандартный численный метод, такой как алгоритм Рунге — Кутты, с адаптивным выбором шага. В данном исследовании используется его реализация в функции `solve_ivp` из библиотеки `scipy.integrate` языка Python, что позволяет обеспечить устойчивость и точность интегрирования [14–16].

Процесс оптимизации параметров ПИД-регулятора основан на численном поиске мини-

мума целевого функционала, характеризующего качество переходного процесса. В данной работе применяется метод минимизации, реализованный в `scipy.optimize`, который позволяет находить наилучшие значения коэффициентов регулятора. В качестве критерия качества рассматривается интеграл квадрата ошибки ориентации во времени, что обеспечивает корректный выбор параметров управления.

Инициализация модели включает задание начальных условий, определяющих углы ориентации, угловые скорости аппарата, а также интегральные ошибки регулирования, которые на начальном этапе принимаются равными нулю. В процессе расчета на каждом временном шаге вычисляются текущие ошибки ориентации, затем проводится их интегрирование для учета накопленных отклонений. Далее определяются управляющие моменты в соответствии с законом ПИД-регулятора, а также моделируются случайные атмосферные возмущения, приводящие к возникновению дополнительных аэродинамических моментов. Эти параметры подставляются в уравнения Эйлера, на основе которых рассчитываются новые значения угловых скоростей и ориентации аппарата.

Повторение данного процесса на протяжении всего временного интервала позволяет получить временные зависимости углов ориентации, их скоростей и других переменных, необходимых для анализа устойчивости системы и эффективности управления [17; 18].

8. Результаты

8.1. Сравнительный анализ существующих аналогов МРЛА

Развитие МРЛА для исследования планет опирается на технологии, такие как марсианский Ingenuity и дроны DJI Phantom. Эти аппараты работают в разреженной или плотной атмосфере, но имеют ограничения для исследования Венеры.

Ingenuity от NASA — первый вертолет, совершивший управляемый полет в марсианской атмосфере. Он оснащен соосными винтами

1,2 м и питается от солнечных батарей. Однако его конструкция подходит лишь для разреженной среды¹. Дроны DJI Phantom 4, используемые для аэросъемки, рассчитаны на земные условия и не устойчивы к высоким температурам и агрессивной среде Венеры [19].

Предполагается, что МРЛА подходит для Венеры. Он адаптирован к экстремальным условиям, оснащен жаропрочными материалами и антикоррозийной защитой. Адаптивное управление позволяет ему функционировать в турбулентной атмосфере, выполняя точные измерения. В отличие от других аппаратов МРЛА сочетает маневренность, надежность и устойчивость, обеспечивая новый уровень исследования атмосферы Венеры [3].

8.2. Численное моделирование и анализ результатов интегрирования

Анализ результатов работы программы позволил определить оптимальные значения коэффициентов ПИД-регулятора, соответствующие

заданным условиям (рис. 2). Полученные параметры обеспечивают наилучшее качество управления, минимизируют отклонения ориентации аппарата, повышая его устойчивость при воздействии внешних возмущений:

$$K_{px} = 0.98364438;$$

$$K_{ix} = 0.30600732;$$

$$K_{dx} = 0.04938846;$$

$$K_{py} = 1.02849085;$$

$$K_{iy} = 0.29888653;$$

$$K_{dy} = 0.04904991;$$

$$K_{pz} = 1.02307622;$$

$$K_{iz} = 0.30555037;$$

$$K_{dz} = 0.05098919.$$

Конечные значения углов:

φ : -0.0013 , θ : 0.0006 , ψ : -0.0006 , рад.

Конечные значения угловых скоростей:

ω_x : 0.0005 , ω_y : -0.0001 , ω_z : 0.0002 , рад/с.

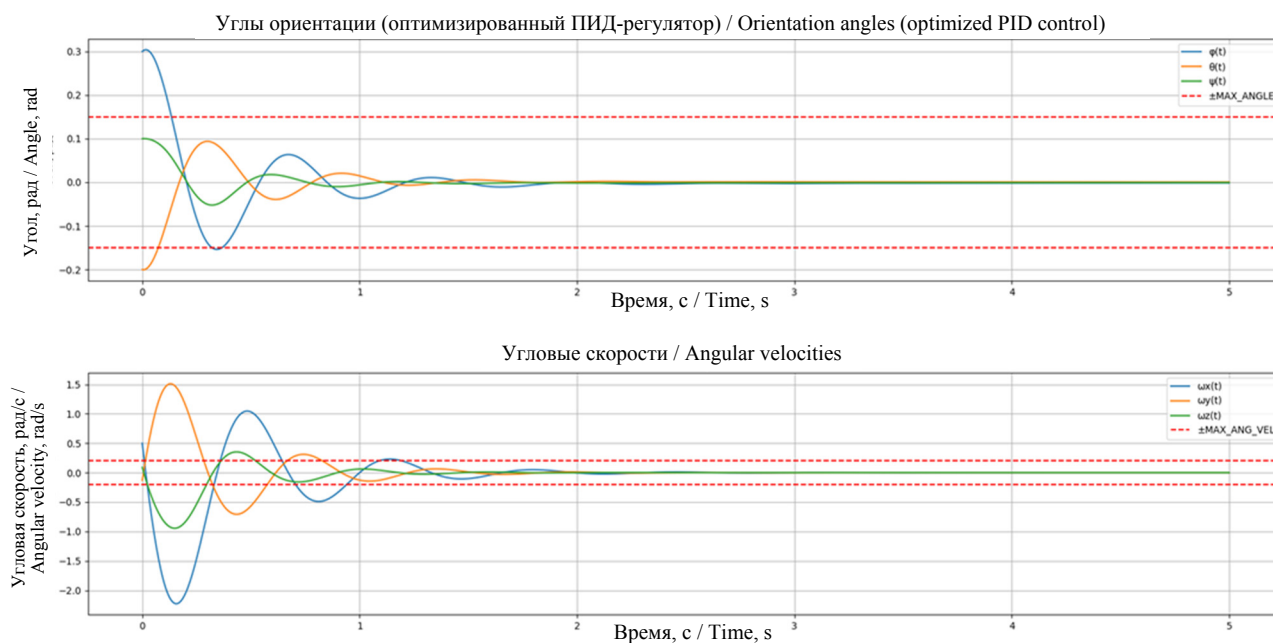


Рис. 2. Стабилизация МРЛА с ПИД-регулятором при случайных ветровых возмущениях

Источник: выполнено В.В. Рыжковым

Figure 2. MRAC stabilization with a PID controller under random wind disturbances

Source: by V.V. Ryzhkov

¹ Farrell WM, McLain JL, Marshall JR, Wang A. Will the Martian helicopter cause a local atmospheric breakdown on Mars? 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2102.0418> (accessed: 28.01.2025).

Заключение

Анализ полученных результатов демонстрирует успешное выполнение поставленных задач, связанных с оптимизацией параметров ПИД-регулятора для стабилизации углового положения МРЛА. Использование метода численной оптимизации позволило подобрать такие коэффициенты регулятора, которые обеспечивают минимальные отклонения углов ориентации от заданных значений, а также быструю стабилизацию при наличии возмущений.

Графики динамики углов и угловых скоростей (см. рис. 2) подтверждают эффективность регулятора: после начальных колебаний система демонстрирует быстрое (порядка двух секунд) затухание отклонений и стремление параметров к целевым значениям. Остаточные ошибки находятся в пределах допустимого диапазона, а угловые скорости стабилизируются практически на нулевом уровне, что свидетельствует о высокой точности управления.

Проведенное исследование подтверждает, что предложенный подход к автоматизированному подбору параметров ПИД-регулятора позволяет минимизировать интегральную ошибку ориентации и улучшить динамические характеристики системы. Разработанный алгоритм стабилизации может быть использован для управления летательными аппаратами в сложных атмосферных условиях, включая сильные возмущения, характерные для облачного слоя Венеры.

Список литературы

1. Moroz V.I. The atmosphere of Venus // *Soviet Physics Uspekhi*. 1971. Vol. 14. No. 3. <https://doi.org/10.1070/PU1971v014n03ABEH004705>
2. Kliore A.J., Moroz V.I., Keating G.M. The Venus International Reference Atmosphere // *Advances in Space Research*. 1985. Vol. 5. No. 11. P. 1–2. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90196-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90196-6)
3. Яценко М.Ю., Воронцов В.А., Рыжков В.В. Обзор проблемных вопросов создания мультироторного летательного аппарата для исследования Венеры // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2023. Вып. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255> EDN: YFMKKG
4. Яценко М.Ю., Воронцов В.А., Рыжков В.В. Системотехническое исследование мультироторного летательного аппарата как перспективного технического средства изучения атмосферы и поверхности планеты Венера // *Космические аппараты и технологии*. 2023.

Т. 7, № 3 (45). С. 220–226. <https://doi.org/10.26732/j.st.2023.3.06> EDN: UNAKMH

5. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // *Системы и средства автоматизации*. 2006. № 4. С. 66–74. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (дата обращения: 12.11.2024)

6. Лю Ф. Сравнительный анализ методов настройки ПИД-регуляторов // *Научные исследования*. 2023. С. 23–26. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51524> (дата обращения: 12.11.2024)

7. Лобатый А.А., Гу П. Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. № 1. С. 10–15. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15> EDN: KFOYKO

8. Саблина Г.В., Маркова В.А. Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // *Автоматизация*. 2022. Т. 58. № 4. С. 110–117. <https://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY

9. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолёта. Пространственное движение. Москва : Машиностроение, 1983. 320 с.

10. Aslanov V.S., Ledkov A. Attitude dynamics and control of space debris during ion beam transportation. Amsterdam : Elsevier Publ.; 2023. 312 p. ISBN 978-0-32399-299-2 ISBN 978-0-32399-300-5

11. Иванов А.М., Беляев Ф.С., Беляев С.П., Волков А.Е., Реснина Н.Н. Применение метода Нелдера–Мида для оптимизации выбора констант модели Лихачёва–Волкова // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2022. Т. 9, вып. 4. С. 693–704. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.411> EDN: TMNRBL

12. Балакин В.Л., Крикунов М.М. Возмущенное движение гиперзвукового самолета при наборе высоты // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-7-20> EDN: YOTZWJ

13. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. Киев : Наукова думка, 1977. 156 с.

14. Ледков А.С. Динамика и управление цилиндрическим космическим мусором при бесконтактной транспортировке ионным потоком // *Труды МАИ*. 2023. № 131. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-04> EDN: XUITIS

15. Нуньес-Иглесиас Х., ван дер Уолт Ш., Дэш-ной Х. Элегантный SciPy : научное программирование на Python. Москва : ДМК Пресс, 2018. 350 с. ISBN 978-5-97060-600-1

16. Хилл К. Научное программирование на Python / пер. с англ. А.В. Снастина. Москва : ДМК-Пресс, 2021. 646 с. ISBN 978-5-97060-914-9

17. Любанович Б. Простой Python: современный стиль программирования / пер. с англ. Е. Зазноба. 2-е

изд. Санкт-Петербург : Питер, 2021. 592 с. ISBN 978-5-4461-1639-3

18. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. Москва: Наука, 1985. 352 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=1212928&pg=3> (дата обращения: 21.11.2024).

19. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A. Использование беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 RTK для топографического картографирования прибрежных зон // Международные архивы фотограмметрии, дистанционного зондирования и пространственной информации. 2019. Т. XLII-2/W13. С. 625–630. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019>

References

1. Moroz VI. The atmosphere of Venus. *Soviet Physics Uspekhi*. 1971;14(3):317. <https://doi.org/10.1070/PU1971v014n03ABEH004705>

2. Kliore AJ, Moroz VI, Keating GM. The Venus International Reference Atmosphere. *Advances in Space Research*. 1985;5(11):1–2. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90196-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90196-6)

3. Yatsenko MYu, Vorontsov VA, Ryzhkov VV. Review of problematic issues in creation of a multicopter aircraft for Venus exploration. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2023;(2):8. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255> EDN: YFMKKG

4. Yatsenko MYu, Vorontsov VA, Ryzhkov VV. Systems engineering study of a multicopter aircraft as a promising tool for studying the atmosphere and surface of Venus. *Spacecraft and Technologies*. 2023;7(3):220–226. (In Russ.) <https://doi.org/10.26732/j.st.2023.3.06> EDN: UNAKMH

5. Denisenko VV. PID regulators: principles of construction and modifications. *Systems and Automation Devices*. 2006;(4):66–74. (In Russ.) Available from: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (accessed: 12.11.2024)

6. Liu F. Comparative analysis of PID controller tuning methods. *Scientific Researches*. 2023;23–26. (In Russ.) Available from: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51524> (accessed: 12.11.2024)

7. Lobaty AA, Gu P. Mathematical modeling of movement of multi-rotor type aircraft. *System analysis and applied information science*. 2023;(1):10–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15> EDN: KFOYKO

8. Sablina GV, Markova VA. Tuning of PID controller parameters in a system with a second-order object with

delay. *Avtometriya*. 2022;58(4):110–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/AUT20220411> EDN: RIZPWY

9. Byushgens GS, Studnev RV. *Dynamics of the Aircraft. Spatial Movement*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1983. (In Russ.)

10. Aslanov VS, Ledkov A. *Attitude dynamics and control of space debris during ion beam transportation*. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2023. 312 p. ISBN 978-0-32399-299-2 ISBN 978-0-32399-300-5

11. Ivanov AM, Belyaev FS, Volkov AE, Belyaev SP, Resnina NN. Application of the Nelder-Mead method for optimizing the selection of constants of the Likhachev-Volkov model. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2022;9(4):693–704. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.411> EDN: TMNRBL

12. Balakin VL, Krikunov MM. Disturbed motion of a hypersonic vehicle in climb. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019;18(2):7–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-2-7-20> EDN: YOTZWJ

13. Kovtunen VM, Kameko VF, Yaskevich EP. *Aerodynamics of orbital spacecraft*. Kiev: Naukova Dumka; 1977. (In Russ.)

14. Ledkov A.S. Dynamics and control of cylindrical space debris during contactless ion beam assisted transportation. *Trudy MAI*. 2023;(131):4. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-04> (In Russ.) EDN: XUITIS

15. Nunez-Iglesias H, van der Walt S, Dashnoi H. *Elegant SciPy: Scientific Programming in Python*. Moscow: DMK Press; 2018. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-600-1

16. Hill K. *Scientific Programming in Python*. Translated from English by A.V. Slastin. Moscow: DMK Press; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-914-9

17. Lobanovich B. *Simple Python: Modern Programming Style*. 2nd ed. Saint Petersburg: Piter Publ.; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-4461-1639-3

18. Voronov AA. *Introduction to the Dynamics of Complex Controlled Systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.) Available from: <https://reallib.org/reader?file=1212928&pg=3> (accessed: 21.11.2024).

19. Taddia Y, Stecchi F, Pellegrinelli A. Use of the DJI Phantom 4 RTK unmanned aerial vehicle for topographic mapping of coastal areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-2/W13:625–630. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-2019>

Сведения об авторе

Рыжков Владислав Валентинович, аспирант кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 2911-4515, ORCID: 0009-0008-2756-8479; e-mail: dinozavr.ru@mail.ru

About the author

Vladislav V. Ryzhkov, postgraduate student of the of the Department 604 “System Analysis and Control”, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamsk highway, Moscow, 125993, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2911-4515, ORCID: 0009-0008-2756-8479; e-mail: dinozavr.ru@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154

EDN: LRKTFT

Научная статья / Research article

Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений

А.А. Меркулов^a, И.В. Степанян^b

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Российская Федерация

✉ amerkulov@levelgroup.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 января 2025 г.

Доработана: 3 марта 2025 г.

Принята к публикации: 7 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Правильно спроектированная инженерная концепция жилого многоквартирного дома позволяет на этапе подготовки к строительству снизить имеющиеся риски и учесть факторы, которые на практике, ввиду ограниченного характера специализированных экспертных знаний, иногда остаются без должного внимания. В качестве методологической базы и основополагающих методов исследования выдвинуты теория экспертных систем и математический аппарат на основе нечеткой логики. Цель исследования — разработка математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству на основе теории нечетких множеств и методов поддержки принятия решений. Задача исследования — разработка общих математических принципов решения прикладных задач с применением специализированных экспертных систем. В результате исследования разработаны математические основы многофункциональной экспертной системы для формирования концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству; создана нечеткая база знаний; восстановлена проекция многомерной функции поверхности отклика, отображающая зависимость лингвистических переменных; разработаны математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству.

Ключевые слова: логические операции, нечеткие множества, алгоритм Мамдани, алгоритм Сугено, интеллектуальные системы

Вклад авторов

Меркулов А.А. — написание исходного текста, визуализация; Степанян И.В. — руководство, методология исследования, валидация.

Для цитирования

Меркулов А.А., Степанян И.В. Общие математические принципы определения инженерной концепции многоквартирных домов на основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 144–154. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154>

© Меркулов А.С., Степанян И.В., 2025



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

General Mathematical Principles for Determining the Engineering Concept of Apartment Buildings Based on Expert Analytical Methods and Decision Support Systems

Alexander A. Merkulov^a, Ivan V. Stepanyan^b

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bInstitute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ amerkulov@levelgroup.ru

Article history

Received: January 15, 2025

Revised: March 3, 2025

Accepted: March 7, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. A well-designed engineering blueprint for a residential apartment building can effectively mitigate potential hazards during the preparatory phase of construction. This approach enables the consideration of factors that, due to the constraints inherent in specialized expertise, frequently go unaddressed in practice. The theory of expert systems and mathematical apparatus based on fuzzy logic are put forward as the methodological basis and fundamental research methods. The objective of the present study is to formulate mathematical principles that facilitate the determination of the engineering concept of apartment buildings at the preparatory stage of construction, based on the theory of fuzzy sets and decision support methods. The research objective is to develop general mathematical principles for solving applied problems using specialized expert systems. The research yielded the development of the mathematical foundations of a multifunctional expert system for the conceptualization of apartment buildings during the preparatory phase of construction; a fuzzy knowledge base was created. The projection of a multidimensional response surface function has been restored, reflecting the dependence of linguistic variables. Mathematical principles for determining the engineering concept of multi-family residential buildings at the preparatory stage of construction have been developed.

Keywords: logical operations, fuzzy sets, Mamdani algorithm, Sugeno algorithm, intelligence systems

Authors' contribution

Merkulov A.A. — writing-original draft, visualization, validation; Stepanyan I.V. — supervision, methodology, investigation, validation.

For citation

Merkulov AA, Stepanyan IV. General mathematical principles for determining the engineering concept of apartment buildings based on expert analytical methods and decision support systems. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2): 144–154. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-144-154>

Введение

Развитие математической логики и природоподобных технологий способствовало значительному прогрессу в области искусственного интеллекта, что отражается на многих областях жизнедеятельности общества, в частности на сфере строительства. При этом стало очевидно, что подготовка к возведению объекта нуждается в системе поддержки принятия инженерных решений.

Актуальность рассматриваемой темы и востребованность соответствующих технологий обусловлены тем, что на практике на этапе проектирования строительных объектов порой допускаются ошибки, которые дорого обходятся как строительным организациям, так и городу. В связи с изложенным требуется разработка математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных домов с целью формализации знаний для их применения на этапе проектирования и поддержки при-

нения ключевых инженерных решений. Данная проблематика относится к сфере искусственного интеллекта. Нейросетевые технологии показали свою значимость, но требуют наличия обучающей выборки.

Существующие методы нечетких экспертных систем (ЭС) основаны на математических операциях, оперирующих экспертными знаниями на основе теории нечетких множеств. ЭС представляют собой интеллектуальные программы, основанные на экспертных знаниях, способные анализировать большой объем данных с учетом заданных параметров и формировать информацию, необходимую для принятия решений. *Цель исследования* — разработка общих математических принципов определения инженерной концепции многоквартирных жилых домов на этапе подготовки к строительству, а также разработка на их основе экспертно-аналитических методов и систем поддержки принятия решений.

1. Разработка общих математических принципов проектирования системы поддержки принятия инженерных решений в области строительства

Система поддержки принятия решений — автоматизированная информационная система, предназначенная для оказания помощи лицам, принимающим решения в неоднозначных, нечетких или сложных ситуациях¹ [1–3]. Использование нечеткой логики при создании ЭС позволяет учитывать нелинейную зависимость между переменными и использовать модели неопределенности в задачах строительства. Нечеткая и четкая логика — два разных подхода к описанию, представлению и формализации знаний. Инженерия знаний — область ИИ, изучающая организацию хранения и анализа знаний в экспертных системах, включая методы представления, приобретения, структурирования, поиска, извлечения и применения знаний [4].

Лингвистические переменные служат для обозначения объектов, которые могут быть ис-

пользованы в качестве аргументов при функционировании ЭС. Функции принадлежности в нечетком логическом выводе представляют собой математические функции, которыми удобно оперировать в условиях неопределенности или неполноты информации. Функция принадлежности определяет, насколько конкретное числовое значение принадлежит к определенной лингвистической переменной (или их набору), и возвращает степень принадлежности (от 0 до 1) элемента каждой категории. Функции принадлежности лингвистических переменных задаются в виде кривых, которые могут быть треугольными, трапециевидными, гауссовыми и другими — в зависимости от потребностей и характеристик решаемой задачи (рис. 1).

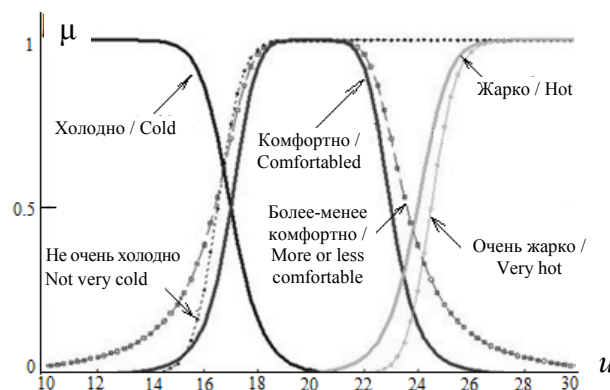


Рис. 1. Функции принадлежности лингвистической переменной «температура»
Источники: выполнено И.В. Степняном, А.А. Меркуловым

Figure 1. Membership functions of the linguistic variable “temperature”
Source: by I.V. Stepanyan, A.A. Merkulov

Объединение нечетких множеств позволяет объединить два или более нечетких множества в одно. Результатом объединения является новое нечеткое множество, включающее элементы, которые принадлежат хотя бы одному из исходных множеств. Операция объединения ($A \cup B$) определяется как максимум функций принадлежности элементов в этих множествах.

Пересечение нечетких множеств позволяет найти элементы, общие для двух или более не-

¹ Скитер Н.Н., Костинова А.В. Интеллектуальные системы на основе методов нечеткой логики : учеб. пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2020. 64 с. EDN: OGHNHR

четких множеств. Эта операция проводится, если нужно определить степень принадлежности элементов всем указанным нечетким множествам. Результатом операции пересечения ($A \cap B$) является новое нечеткое множество (рис. 2).

Основными и наиболее распространенными системами нечеткого логического вывода являются системы Мамдани (Mamdani) и Сугено (TS — Takagi-Sugeno). Выбор одной из них для построения экспертной системы зависит от конкретных требований ЭС. Алгоритм Сугено [5] используют, когда имеются количественные данные или математические модели для выражения взаимосвязи между входными и выходными данными. Модель Сугено может обрабатывать сложные отношения с меньшим количеством правил благодаря своей способности моделировать математические отношения. Алгоритм Сугено сложнее понять и интерпретировать. Модель Мамдани [6] может требовать более обширной базы знаний, но обеспечивает более высокую интерпретируемость благодаря работе с лингвистическими переменными и правилами.

Для построения экспертной системы целесообразно использовать алгоритм Мамдани, который адаптируется к структуре базы знаний (БЗ) и специфике строительной предметной области.

Алгоритм логического вывода Мамдани состоит из следующих шагов:

1) определение лингвистических переменных и их нечетких множеств;

2) создание базы знаний, которая логически связывает входные и выходные лингвистические переменные. Каждое правило состоит из условия («если...») и результата («то...»). Для пересечения степеней принадлежности, как правило, используется операция «и»;

3) агрегация выводов с объединением их в результирующее нечеткое множество путем объединения результатов правил для каждой лингвистической переменной. Далее приведена обобщенная схема алгоритма (рис. 3);

4) дефаззификация для преобразования полученного нечеткого множества в числовое значение.

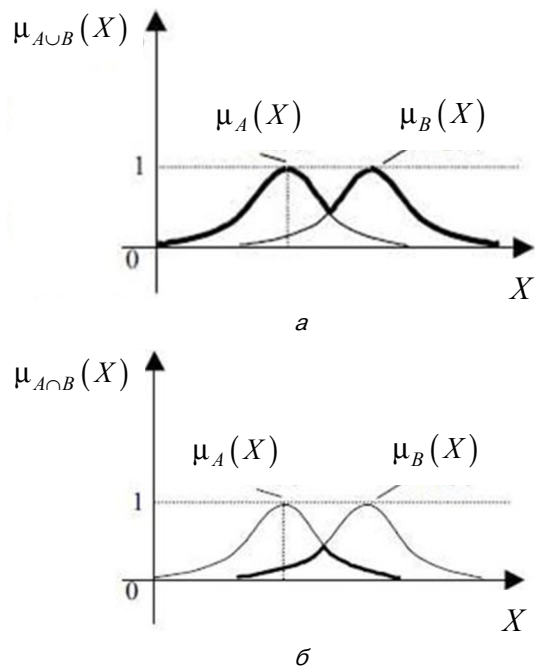


Рис. 2. Операции над нечеткими множествами:

a — объединение; *б* — пересечение

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 2. Operations on fuzzy sets:

a — union; *b* — intersection

Source: by A.A. Merkulov

Дефаззификация — функция преобразования нечеткого множества в точечное числовое значение. Далее приведены основные методы дефаззификации. Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в различных сценариях в зависимости от задачи и требований на основе экспериментальных данных.

1. *Центр тяжести* (Center of Gravity, COG, Centroid): средневзвешенное значение всех элементов, принадлежащих нечеткому множеству. Вес каждого элемента равен его степени принадлежности.

2. *Метод максимина* (Max-Min Method) — выбирается элемент с наибольшей степенью принадлежности к нечеткому множеству. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

3. *Метод взвешенного среднего* (Weighted Average) — каждый элемент, принадлежащий нечеткому множеству, взвешивается в соответствии с его степенью принадлежности, затем эти взвешенные значения усредняются.

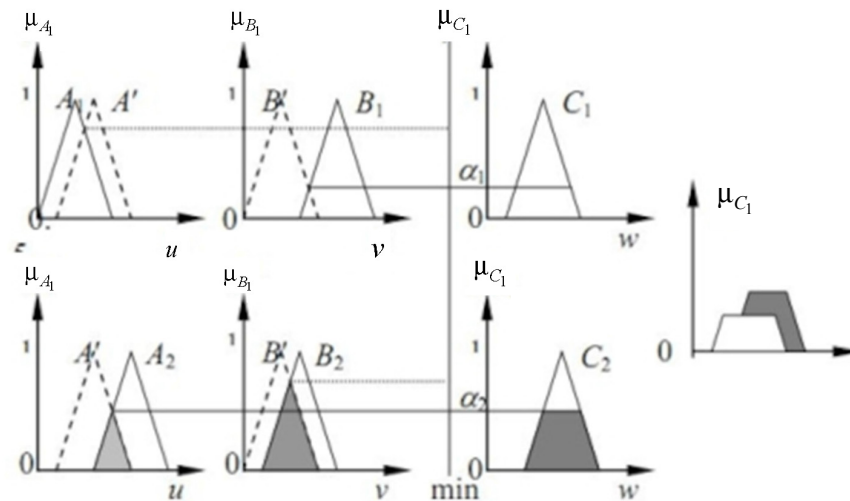


Рис. 3. Агрегация логического вывода методом Мамдани

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 3. Aggregation of logical inference by the Mamdani method

Source: by A.A. Merkulov

4. *Модифицированный метод центров сумм* (Modified Center of Sums, MCS) — взвешенное среднее значение всех элементов, при этом вес каждого элемента определяется как сумма степеней принадлежности всех элементов, которые больше данного элемента или равны ему.

5. *Метод усреднения максимальных значений* (Averaging the Maximum of Maximums, AMOM) — вычисляются средние значения элементов с максимальной степенью принадлежности на каждой итерации, дефаззифицированное значение является результатом последней итерации.

6. *Метод максимума из максимумов* (Largest of Maxima, LOM) — выбирается элемент с наибольшей степенью принадлежности во множестве. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

7. *Метод наименьшего из максимумов* (Smallest of Maxima, SOM) — выбирается элемент с наименьшей степенью принадлежности во множестве. Дефаззифицированное значение будет равно этому элементу.

8. *Метод бисекции* (Bisector method) — элемент, который делит нечеткое множество на две

равные части (дефаззифицированное значение находится точно в середине множества).

Выбор метода дефаззификации зависит от конкретной проблемной области, базы знаний экспертной системы и требований, предъявляемых к результатам нечеткого логического вывода (рис. 4).

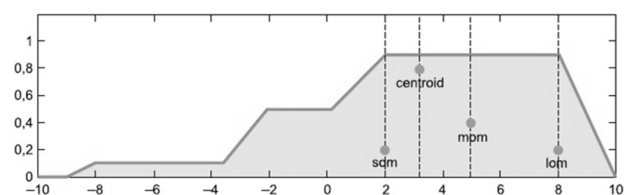


Рис. 4. Иллюстрация к методам приведения к четкости: som, centroid, mom, lom

Источник: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 4. Illustration of the methods of defuzzification: som, centroid, mom, lom

Source: by A.A. Merkulov

Одним из ключевых аспектов исследования является реконструкция функции поверхности отклика, которая проецирует гиперповерхность в n -мерное пространство, где n отражает количество лингвистических пере-

менных [7]. Пространство, в котором построена поверхность отклика, содержит числовые значения переменных (факторов). Поверхность отклика нечеткой экспертной системы является инструментом верификации и графическим представлением результатов функционирования модулей логического вывода [7; 8]. Данная поверхность — многомерный объект, для анализа которого целесообразно применять проекции. Визуализация трехмерных проекций поверхностей отклика позволяет определить взаимосвязь между входными переменными и результатами работы экспертной системы и выработать рекомендации по настройке функционирования, включая подбор методов дефаззификации, форм кривых функций принадлежности и других параметров. Применение и развитие инструментов нечеткой логики для решения актуальных задач строительной отрасли представлено в [9–12]. В [10; 13] рассматривается сравнительный анализ эффективности применения алгоритмов

нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в строительстве для систем поддержки принятия решений.

Архитектура нечеткой экспертной системы поддержки принятия решений в строительной области включает базу знаний, которая представляет собой набор формализованных правил. На вход системы подаются четкие значения входных переменных, на выходе имеем дефаззифицированные значения рассчитанных нечетких переменных в виде их четких значений (рис. 5).

Экспертная система на входе и выходе оперирует числовыми значениями и позволяет формальным методом (без применения дифференциальных уравнений, основываясь на теории нечетких множеств) формализовать достаточно сложную взаимосвязь между концептами в той или иной специализированной предметной области определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству.



Рис. 5. Взаимосвязь основных функциональных блоков ЭС поддержки принятия решений
Источник: выполнено А.А. Меркуловым

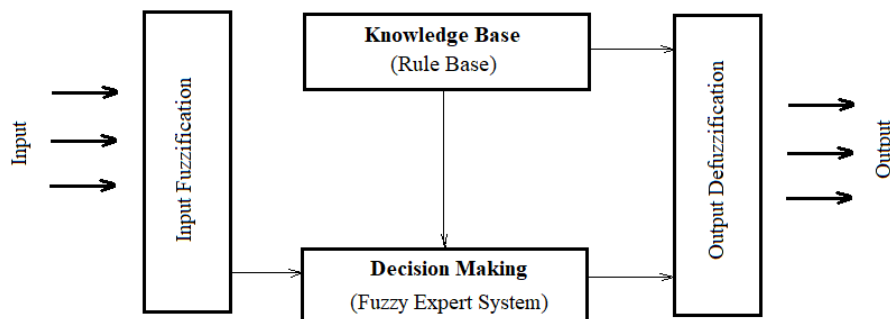


Figure 5. The relationship of the main functional blocks of the decision support system
Source: by A.A. Merkulov

2. Результаты и обсуждение экспериментальных исследований и оценка характеристик экспертной системы

В базе знаний были установлены логические взаимосвязи между входными и выходными переменными, что позволило осуществлять вывод и принимать обоснованные решения [14]. Экспериментальные исследования с расчетом характеристик БЗ необходимы для анализа и настройки экспертных функций, а также для дальнейшего развития и совершенствования разработанного инструментария. Созданная база знаний экспертной системы поддержки принятия инженерных решений в области строительства состоит из следующих модулей:

- ♦ ЭС для расчета количества лифтов в многоквартирных домах;
- ♦ ЭС для расчета инвестиционной привлекательности многоквартирных домов;
- ♦ ЭС для расчета этажности многоквартирных домов;
- ♦ ЭС для расчета ориентирования многоквартирных домов по параметрам инсоляции;
- ♦ ЭС для оценки технического состояния многоквартирных домов.

В ходе проведения данного исследования была разработана структура базы знаний, состоящая из отдельных модулей, каждый из которых отвечает за определенную проблемную область. Такая взаимосвязанная структура позволяет решать смежные инженерные задачи в различных областях подготовки многоквартирного дома к строительству. На основе разработанной структуры базы знаний, выбранных лингвистических переменных и их значений, а также входных и выходных переменных для каждой подсистемы логического вывода были определены и описаны все необходимые переменные.

В ходе исследования были подобраны функции принадлежности с учетом экспертных знаний о каждой предметной области. Каждая лингвистическая переменная проанализирована с целью определения диапазона ее значений и формы функций принадлежности для обоснованного логического вывода. Кроме того, разра-

ботаны входные и выходные переменные для каждой подсистемы логического вывода, что обеспечило передачу структурированной информации между различными модулями. Таким образом, функциональные возможности базы знаний позволили решать узкоспециализированные задачи в области строительства многоквартирных домов.

В результате проведения серии численных экспериментов и детального анализа различных проблемных областей строительства, связанных с посадкой здания и определением его технических и экономических показателей, была установлена логическая взаимосвязь, реконструированы поверхности отклика и определена зависимость между входными и выходными переменными в виде базы знаний экспертной системы. Методы дефазсификации подбирались для получения требуемых форм поверхностей отклика, описывающих соответствующие предметные области.

Математическая модель посадки жилых зданий на заданном земельном участке строительства представляет собой систему поддержки принятия решений при посадке застройки на земельный участок и включает подсистемы оценки количества этажей (многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для жилых районов, многоквартирные жилые дома, смешанная жилая застройка для кварталов, блокированные жилые дома для кварталов, блокированные жилые дома для жилых районов), а также систему ориентирования здания по параметрам инсоляции и географической широты строительного объекта. Учитывается поверхность отклика переменных «количество комнат», «географическая широта», «направление оси окна в секторах с азимутом».

Разработанная экспертная система предназначена для анализа различных градостроительных, проектных, продуктовых и других параметров земельного участка, рассматриваемого для приобретения под застройку. Система анализирует их и выдает параметры для графического моделирования посадки здания на данном участке через соответствующий блок экспертной системы. Посадка может изменяться в

зависимости от значений вводимых параметров: «высота здания», «количество квартир на этаже», «площадь квартир» и т. д. Систему можно использовать как для подбора вариантов зданий для конкретного земельного участка, так и для оценки соответствия выбранного здания градостроительным, проектным, продуктовым и прочим параметрам.

При расчете количества лифтов, комнат и этажей результирующий параметр округлялся до целого числа. Правильное количество лифтов способствует созданию благоприятной атмосферы в здании, повышению производительности труда и улучшению качества обслуживания жителей.

Один из расчетных модулей выдает значение инвестиционной привлекательности в миллионах рублей. Это значение может быть использовано как на этапе инвестиционной оценки потенциального земельного участка для застройщика, так и для оценки технико-экономических показателей будущего жилого комплекса.

Система принимает на вход параметры: «количество квартир в доме», «количество квартир на этаже», «площадь комнаты», «средняя площадь кухни», «высота потолков» (рис. 6).

Разработанная ЭС может быть расширена для анализа следующих параметров земельного участка: местоположения, размера, формы, рельефа, экологической обстановки, окружающих факторов и др. На основании этой информации расширенная система может предоставить графическую визуализацию посадки здания на заданном участке. Это поможет застройщику принять более обоснованное решение при выборе земельного участка для строительства жилого комплекса.

Количественные взаимосвязи между лингвистическими переменными обладают выраженным нелинейным характером, можно наблюдать локальные экстремумы функций (рис. 7). Это связано с параметрами кривых, которые задают функции принадлежности лингвистических переменных.

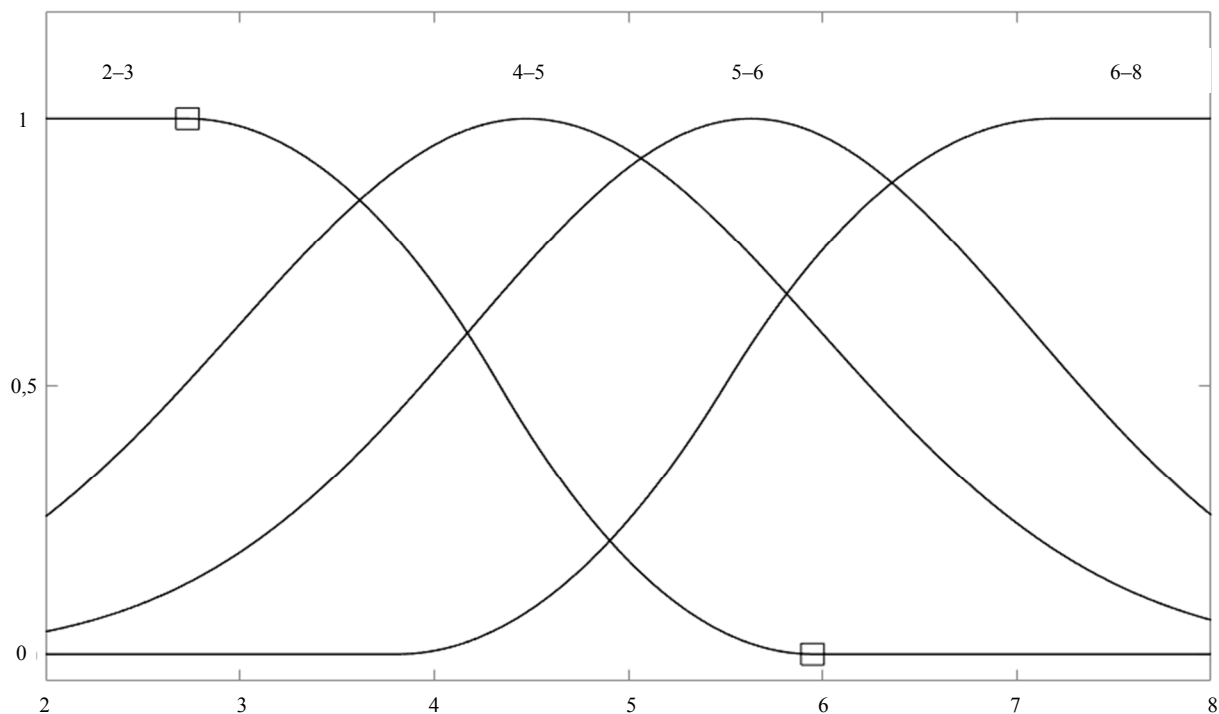


Рис. 6. Функции принадлежности входной лингвистической переменной «количество квартир на этаже», шт.
Источники: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 6. Membership functions of the output linguistic variable “number of apartments per floor”, pcs.
Source: by A.A. Merkulov

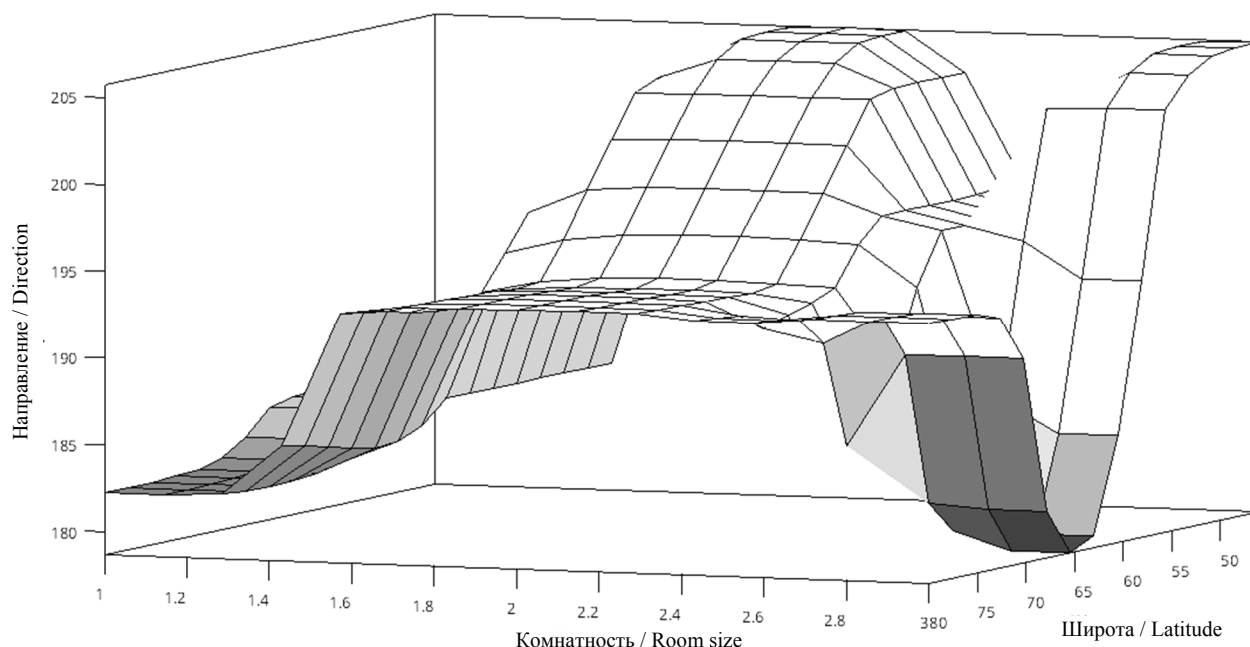


Рис. 7. Поверхность отклика переменных «комнатность», шт.; «широта», град.; «направление оси окна в секторах с азимутом», град.

Источники: выполнено А.А. Меркуловым

Figure 7. Response surface of the variables “room size”, pcs.; “latitude”, deg.; “direction of the window axis in sectors with azimuth”, deg.

Source: by A.A. Merkulov

Данные экстремумы можно отнести к артефактам логического вывода, связанным с формой функций принадлежности. Следует отметить, что в разработанном прототипе не все локальные экстремумы поверхностей отклика полностью отразили специфику проблемной области, что свидетельствует о необходимости пополнения БЗ более точными правилами, отражающими экспертные знания.

При эквивалентном наборе правил в БЗ разработанная многомодульная архитектура ЭС является более выгодной по сравнению с одномодульной, где база знаний представляет собой единый набор правил для логического вывода, поскольку в многомодульном подходе каждый модуль имеет индивидуальный алгоритм дефаззификации. Таким образом, многомодульная архитектура БЗ позволяет более гибко подстраивать выходные значения под каждую проблемную область в сфере строительства.

В данной работе рассмотрены математические модели и методологические принципы,

которые в дальнейшем могут быть расширены с применением систем машинного обучения и нейронных сетей [15; 16] для решения задач по проектированию инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству, а также для решения смежных задач, частично рассмотренных в публикациях [17–19].

Заключение

Применение разработанной экспертной системы для определения инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству способствует повышению качества принимаемых решений, ускорению разработки и внедрению проектов, а также снижению материальных затрат. Методологической основой исследования служат теория нечетких множеств и алгоритмы нечеткого логического вывода.

В ходе проведенного исследования разработаны общие математические принципы опре-

деления инженерной концепции многоквартирных домов на этапе подготовки к строительству на основе экспертных методов и систем поддержки принятия решений. Приведены основные понятия из области нечеткой логики, включая лингвистические переменные и нечеткий логический вывод, операции с функциями принадлежности для систем нечеткого логического ввода. Рассмотрены алгоритмы дефазификации нечетких множеств для управления выводом нечеткой логической системы поддержки принятия решений в области строительства. Предложена схема интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области строительства на базе алгоритма Мамдани.

Список литературы / References

1. Caiado RGG, Scavarda LF, Gavião LO, Ivson P, Nascimento DL De M, Garza-Reyes JA. A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. *International Journal of Production Economics*. 2021;231:107883. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883> EDN: XZZKZY
2. Haririchian E, Lahmer T. Developing a hierarchical type-2 fuzzy logic model to improve rapid evaluation of earthquake hazard safety of existing buildings. *Structures*. 2020;28:1384–1399. <http://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.048> EDN: GJIYKQ
3. Lanbaran NM, Celik E, Yiğider M. Evaluation of investment opportunities with interval-valued fuzzy topsis method. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2020;5(1):461–474. <http://doi.org/10.2478/amns.2020.1.00044> EDN: QDEPPY
4. Kendal SL, Creen M. *An introduction to knowledge engineering*. Springer London, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-667-4>
5. Wang Y, Zhao Z, Guo J, Zou L, Ma L. A survey on control for Takagi-Sugeno fuzzy systems subject to engineering-oriented complexities. *Systems Science & Control Engineering*. 2021;9(1):334–349. <http://doi.org/10.1080/21642583.2021.1907259> EDN: BYNODY
6. Lucchese LV, de Oliveira GG, Pedrollo OC. Mamdani fuzzy inference systems and artificial neural networks for landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*. 2021;106(3):2381–2405. <http://doi.org/10.1007/s11069-021-04547-6> EDN: OITGPK
7. Azar AT. (ed.) *Fuzzy systems*. BoD — Books on Demand, 2010. ISBN: 9537619923
8. Jana DK, Pramanik S, Sahoo P, Mukherjee A. Interval type-2 fuzzy logic and its application to occupational safety risk performance in industries. *Soft Computing*. 2019;23:557–567. <http://doi.org/10.1007/s00500-017-2860-8> EDN: CRZKUJ
9. Kumar S, Anbanandam R. An integrated Delphi-fuzzy logic approach for measuring supply chain resilience: an illustrative case from manufacturing industry. *Measuring Business Excellence*. 2019;23(3):350–375. <http://doi.org/10.1108/MBE-01-2019-0001>
10. Al-Ani BRK, Erkan TE. A study of load demand forecasting models in electricity using artificial neural networks and fuzzy logic model. *International Journal of Engineering*. 2022;35(6):1111–1118. <http://doi.org/10.5829/ije.2022.35.06c.02> EDN: WOZLQP
11. Hendiani S, Bagherpour M. Developing an integrated index to assess social sustainability in construction industry using fuzzy logic. *Journal of cleaner production*. 2019;230:647–662. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.055>
12. Hedao N, Pawar A. Risk Assessment Model Based on Fuzzy Logic for Residential Buildings. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2021;29(4):37–48. <http://doi.org/10.2478/sjce-2021-0026> EDN: DQLKOL
13. Panchalingam R, Chan KC. A state-of-the-art review on artificial intelligence for Smart Buildings. *Intelligent Buildings International*. 2019;13(4):203–226. <http://doi.org/10.1080/17508975.2019.1613219> EDN: GVDBAU
14. Vilela M, Oluyemi G, Petrovski A. A fuzzy inference system applied to value of information assessment for oil and gas industry. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2019;2(2):1–18. <http://doi.org/10.31181/dmame1902001v> EDN: FBRMFE
15. Fayek AR. Fuzzy logic and fuzzy hybrid techniques for construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020;146(7):04020064. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001854](http://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001854) EDN: AAFXLG
16. Jain A, Sharma A. Membership function formulation methods for fuzzy logic systems: A comprehensive review. *Journal of Critical Reviews*. 2020;7(19):8717–8733.
17. Pezeshki Z, Mazinani SM. Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2019;52(1):495–525. <http://doi.org/10.1007/s10462-018-9630-6> EDN: BLPALL
18. Wang K, Ying Z, Goswami SS, Yin Y, Zhao Y. Investigating the Role of Artificial Intelligence Technologies in the Construction Industry Using a Delphi-ANP-TOPSIS Hybrid MCDM Concept under a Fuzzy Environment. *Sustainability*. 2023;15(15):11848. <http://doi.org/10.3390/su151511848> EDN: FSLOWM
19. Ren X, Li C, Ma X, Chen F, Wang H, Sharma A, Gaba GS, Masud M. Design of multi-information fusion based intelligent electrical fire detection system for green buildings. *Sustainability*. 2021;13(6):3405. <http://doi.org/10.3390/su13063405> EDN: JDNYAS

Сведения об авторах

Меркулов Александр Александрович, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru

Степанян Иван Викторович, доктор биологических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Российская Федерация, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 5644-6735, ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

About the authors

Alexander A. Merkulov, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-0211-808X; e-mail: amerkulov@levelgroup.ru

Ivan V. Stepanyan, Doctor of Biological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, 4 M. Kharitonyevskiy Pereulok, 101990, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5644-6735, ORCID: 0000-0003-3176-5279; e-mail: neurocomp.pro@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-155-167

EDN: LZEWFU

Научная статья / Research article

Обеспечение живучести сложной технической системы в специальных условиях

В.В. Алексеев[✉], Д.А. Иванов[✉], И.Г. Рыжов[✉]

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ ryzhov.ilgen@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 3 января 2025 г.

Доработана: 21 марта 2025 г.

Принята к публикации: 5 апреля 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Аннотация. Цель исследования — разработка алгоритма обеспечения живучести сложной технической системы в специальных условиях. При проведении исследования были применены принципы и методы системного анализа, формальной верификации и математический аппарат темпоральной логики действий. В результате исследования был разработан алгоритм поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении сложной технической системы, базирующийся на темпоральной логике. Отличительными особенностями алгоритма являются возможность формальной верификации проектного решения по системе и наличие механизма обеспечения согласованности проектного решения и реализации. Алгоритм целесообразно применять для обеспечения живучести как вновь разрабатываемых систем на этапах проектирования и ввода в действие, так и уже существующих систем на этапе сопровождения.

Ключевые слова: алгоритм, верификация, информационный поток, темпоральная логика, соответствие проектному решению

Вклад авторов

Алексеев В.В. — общая концепция исследования; Рыжов И.Г. — анализ научной литературы, выводы и рекомендации, разработка алгоритма поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении, написание текста; Иванов Д.А. — методы системного анализа для обеспечения живучести сложной технической системы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Тимакову Алексею Анатольевичу, кандидату технических наук, доценту, за оказанную помощь при проведении данного исследования и Дмитриченко Михаилу Владимировичу за значительный вклад в разработку языка спецификаций TIFL.

Для цитирования

Алексеев В.В., Иванов Д.А., Рыжов И.Г. Обеспечение живучести сложной технической системы в специальных условиях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 155–167. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-155-167>



Ensuring the Survivability of a Complex Technical System Under Special Conditions

Vladimir V. Alekseev[✉], Dmitry A. Ivanov[✉], Ilya G. Ryzhov[✉]

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ ryzhov.ilgen@gmail.com

Article history

Received: January 3, 2025

Revised: March 21, 2025

Accepted: April 5, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The objective of the research presented in this article was to develop an algorithm for ensuring the survivability of a complex technical system under special conditions. The principles and methods of system analysis, formal verification and mathematical apparatus of temporal logic of actions were applied in the research. As a result of the study, an algorithm for searching logical errors in the design solution and software of a complex technical system based on temporal logic was developed. The distinguishing features of the algorithm include the capacity for formal verification of the design solution within the system and the incorporation of a mechanism to ensure the consistency of the design solution and implementation. The application of this algorithm is recommended for the assurance of survivability, encompassing both newly developed systems during the design and commissioning stages, and existing systems during the maintenance stage.

Keywords: algorithm, verification, survivability, information flow, temporal logic, compliance with the design solution

Authors' contribution

Alekseev V.V. — the general concept of research; *Ryzhov I.G.* — analysis of scientific literature, conclusions and recommendations, development of an algorithm for finding logical errors in design solutions and software, writing the text; *Ivanov D.A.* — methods of system analysis to ensure the survivability of a complex technical system.

Acknowledgments

The authors would like to thank Alexey Anatolyevich Timakov, PhD, Associate Professor, for his assistance in conducting this research and Mikhail Vladimirovich Dmitrichenko for his significant contribution to the development of the TIFL specification language.

For citation

Alekseev VV, Ivanov DA, Ryzhov IG. Ensuring the Survivability of a complex technical system under special conditions. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):155–167. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-155-167>

Введение

В настоящее время трудно представить выполнение сложной технической системой (СТС) функциональных задач без использования информационных технологий. Отказы технических и коммуникационных средств, а также ошибки в проектном решении по системе и программном обеспечении (ПО) могут привести к нарушению качества функционирования системы в специальных условиях. Под специальными условиями понимается высокая вероятность воздействия на СТС деструктивных внешних факторов в процессе ее функцио-

нирования, приводящих к нарушению функционирования СТС в целом и, как следствие, снижению живучести.

На данный момент существует множество научных работ, посвященных восстановлению элементов системы и их связей после сбоев и отказов, вызванных внутренними факторами. Результаты, представленные в этих публикациях, не входят в рамки нашего исследования. Большой интерес с точки зрения обеспечения живучести СТС представляют исследования, нацеленные на обнаружение ошибок в проектном решении и ПО, возобновление работы системы в соответствии с предъявляемыми тре-

бованиями после воздействия деструктивных внешних факторов.

Современным направлением исследований является обеспечение живучести СТС, значительную роль в функционировании которых играют информационно-управляющие подсистемы (ИУП) [1]. ИУП управляет объектом с помощью программно реализованных алгоритмов, из чего следует, что функционирование ИУП СТС зависит от качества ПО и корректности алгоритмов. Цена ошибок, допущенных на этапах проектирования СТС (до непосредственной реализации), особенно высока [2].

На основе анализа систематизированных в [3] причин некорректной работы ПО целесообразно выделить в отдельную группу логические ошибки. Под логическими ошибками в данном исследовании будем понимать ошибки в постановке или формализации требований, а также в их реализации, после возникновения которых в результате функционирования системы параметры информационных потоков изменяются не так, как определено конструкторской, программной и эксплуатационной документациями. Следует отметить, что логическая ошибка может быть вызвана деструктивным внешним воздействием на СТС как со стороны злоумышленника, так и действиями легитимного пользователя системы.

При проведении исследования учтено, что информационный процесс представляет собой иерархически упорядоченную структуру информационных процессов и ошибка на низшем уровне иерархии может распространиться на высшие уровни. Ошибки могут привести к функциональному отказу системы самостоятельно или стать причиной получения некорректной или непредусмотренной для пользователя информации, после чего уже пользователь может совершить ошибку и вызвать функциональный отказ системы [1].

Обнаружение подавляющего большинства логических ошибок в ПО на практике выполняется с применением технологий статического

и динамического анализа [4; 5]. Это объясняется относительно высокой точностью и незначительными требованиями к ресурсам, необходимым для их использования.

В [6] показано, что применение статических и динамических анализаторов для выявления логических ошибок, приводящих к нарушению параметров информационных потоков, не является эффективным. Автор предлагает механизм формальной верификации для контроля параметров информационных потоков, в основе которого лежит математический аппарат темпоральной логики. Существенным ограничением предложенного в работе механизма видится ориентированность на работу с хранимыми процедурами баз данных и позднее (после разработки ПО) выявление ошибок.

Противоположный, с точки зрения стадии проектирования, подход представлен в [7]. Описывается поиск логических ошибок в проектном решении с помощью построения DFD (Data Flow Diagram) диаграммы с использованием расширенной нотации Демарко [8] и запросов к логической базе знаний. Недостатком данного подхода является сложность интерпретации результата и неприменимость подхода на этапе проверок соответствия реализации техническому заданию¹.

Проведенный анализ доказывает актуальность разработки алгоритма обеспечения живучести СТС в специальных условиях на основе математического аппарата темпоральной логики, к достоинствам которого можно отнести формализацию зависящих от времени свойств, применимость для моделирования поведения системы, наличие инструментов автоматической проверки модели и визуализации последовательности принимаемых состояний модели системы.

1. Материалы и методы

В [7] представлена методика применения метода дедуктивной верификации для поиска ошибок на этапе проектирования системы.

¹ См.: ГОСТ Р 59793-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. Москва : Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.; [9].

Особенность этой методики заключается в построении DFD-диаграммы с использованием расширенной нотации Демарко [8], которая затем транслируется в программу на языке логического программирования Prolog [9]. Верификация выполняется посредством запросов к логической базе знаний. В процессе верификации строится сеть распространения особых меток, присвоенных данным, и проводится анализ соответствия меток в сети требованиям к системе. Результатом является список всех обнаруженных нарушений.

В [10] представлен подход для анализа наличия логических ошибок, применяемый на этапе проектирования СТС, в основе которого лежит статический анализ DFD-диаграмм. В статье предложено использовать SecDFD (Security Data Flow Diagram), расширение DFD для построения модели системы. Аналогично [7] данным присваиваются метки, основываясь на требованиях к системе. По диаграмме SecDFD строится граф, в узлах которого хранятся метки данных. Контроль параметров информационных потоков выполняется за счет статической проверки соответствия графовой модели требованиям к системе. Соответствие может быть установлено после распространения меток с помощью обхода в ширину графа согласно семантике узлов.

А.М. Каннер продемонстрировал преимущества применения математического аппарата темпоральной логики и инструментальных средств автоматической верификации моделей (в публикации это модели безопасности), сформулированных на формальном языке, пригодном для верификации, для поиска ошибок в модели [11]. При верификации модели в качестве формального языка в [11] использован язык спецификаций TLA^+ (Temporal Logic of Actions) [12] и метод *model checking* [13].

Темпоральная логика — это логика, в которой истинное значение логических формул зависит от момента времени, в котором вычисляются значения этих формул. Основная идея темпоральной логики состоит в том, чтобы фиксировать только относительный порядок собы-

тий — фактически текущее, будущее и прошедшее время [13].

В [6] представлен алгоритм контроля параметров информационных потоков, проверяющий модель вычислений в системе, выполняемых с помощью Oracle/PLSQL блоков. Верификация модели происходит автоматически с использованием инструмента типа *model checker* — TLC (Temporal Logic Checker) [12]. Предложенный А.А. Тимаковым алгоритм выявляет запрещенные политиками безопасности информационные потоки. Анализ траекторий функционирования системы, полученных в результате работы TLC, позволяет сформулировать рекомендации по корректировке кода и изменению политики безопасности для устранения нарушений. Данный алгоритм способен обнаружить логические ошибки как на стадии ввода в действие, так и при сопровождении СТС [8].

Разделение анализа наличия логических ошибок на анализ на этапе проектирования и анализ на этапе реализации позволяет достичь композиционности [10]. Однако разделение анализа порождает проблему согласованности реализации и проектного решения. В [14] представлен подход, основанный на двухэтапном анализе наличия логических ошибок, включающий в себя механизм обеспечения согласованности реализации и проектного решения. Моделирование системы и проверка модели происходит аналогично [10]. Затем строится программная модель с помощью фреймворка GRaViTY [16] и выполняется автоматизированное сопоставление элементов программы с элементами SecDFD, с последующим статическим анализом соответствия реализации системы ее модели.

Описанный в [15] фреймворк GRaViTY способен выполнять проверку артефактов разработки системы, а также обеспечивать синхронизацию изменений между ними. Под артефактами разработки в публикации понимаются модели системы различной степени абстракции и программная реализация. Следует отметить простоту интеграции GRaViTY в суще-

ствующие системы, в которых отсутствуют актуальные модели, с помощью автоматизированного получения моделей из программной реализации. Для анализа наличия логических ошибок в артефактах разработки системы в фреймворке используются статические и динамические проверки.

Проведенный анализ современного состояния исследований в области контроля параметров информационных потоков для обеспечения живучести СТС в специальных условиях обосновывает предположение о целесообразности применения алгоритма в составе ИУП, обладающего следующими особенностями:

- в основе алгоритма лежит математический аппарат темпоральной логики;
- реализация алгоритма должна применяться на этапах проектирования, ввода в действие и сопровождения СТС;
- алгоритм способен контролировать параметры информационных потоков СТС;
- алгоритм выявляет несогласованность реализации ПО СТС и проектного решения.

2. Результаты

В качестве подхода для обеспечения живучести СТС в специальных условиях рассмотрим алгоритм поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении СТС (рис. 1), базирующийся на темпоральной логике.

Для обнаружения логических ошибок в проектном решении и несоответствия программной реализации проектному решению СТС необходимо выполнить моделирование в виде DFD-диаграммы функций СТС, работающих с наиболее чувствительной информацией непосредственно или через использование других функций.

Под чувствительной информацией будем понимать информацию, доступ к которой ограничен и раскрытие которой может привести систему к снижению эффективности функционирования системы [16]. Поиск функций и объектов, содержащих чувствительную информацию,

осуществляется аналитиками системы исходя из понимания особенностей ее функционирования.

По полученной на прошлом шаге DFD-диаграмме необходимо написать TLA^+ -спецификацию. Процесс написания TLA^+ -спецификаций является трудоемкой и весьма нетривиальной задачей. Это объясняется тем, что TLA^+ ориентирован на описание поведения систем, но не на описание информационных потоков.

Для решения этой проблемы в алгоритм был добавлен шаг составления спецификации на языке TIFL (TIFL-спецификации), описывающей информационные потоки в системе.

Язык TIFL (Trivial Information Flow Language) обладает простым для описания информационных потоков синтаксисом и является доменно-специфичным языком (DSL — Domain Specific Language). Доменно-специфичные языки — это языки, ориентированные на решения проблем в конкретных областях в отличие от языков общего назначения [17]. Обоснованием разработки языка TIFL служит проведенный анализ исследования, опубликованного в [18]. Среди представленных автором доменно-специфичных языков в категории контроля параметров информационных потоков (IFC — Information Flow Control) не было выявлено существующего языка, который можно было бы применить для эффективного описания информационных потоков и последующей трансляции в TLA^+ -спецификацию.

TIFL-спецификация является формальным представлением DFD-диаграммы, необходимым для проведения верификации параметров информационных потоков (обнаружения потоков информации, не соответствующих заданным критериям) в автоматическом режиме. В контексте верификации параметров информационных потоков нас интересуют источники и получатели информации, а также условия возникновения информационных потоков.

Проверка TIFL-спецификации выполняется посредством трансляции спецификации на языке TIFL в спецификацию на языке TLA^+

с помощью утилиты `tifl2tla`² и последующего запуска утилиты TLC.

При проигрывании модели с помощью TLC проверяется, что наблюдаемые результаты выполняемых СТС функций не противоречат правилам разграничения доступа к информационным ресурсам, предъявляемым к системе. Далее проверяемое условие будем называть инвариантом. Если в конце проверки модели обнаруживается, что объект системы начинает содержать более чувствительную информацию,

то следует повторить проигрывание модели, считая, что данный объект в начальном состоянии содержит информацию, чей уровень чувствительности соответствует уровню текущего конечного состояния.

Повторять проигрывание моделей целесообразно до тех пор, пока при очередном проигрывании моделей не выявится нарушение инварианта или не перестанет меняться уровень чувствительности информации в объектах системы.

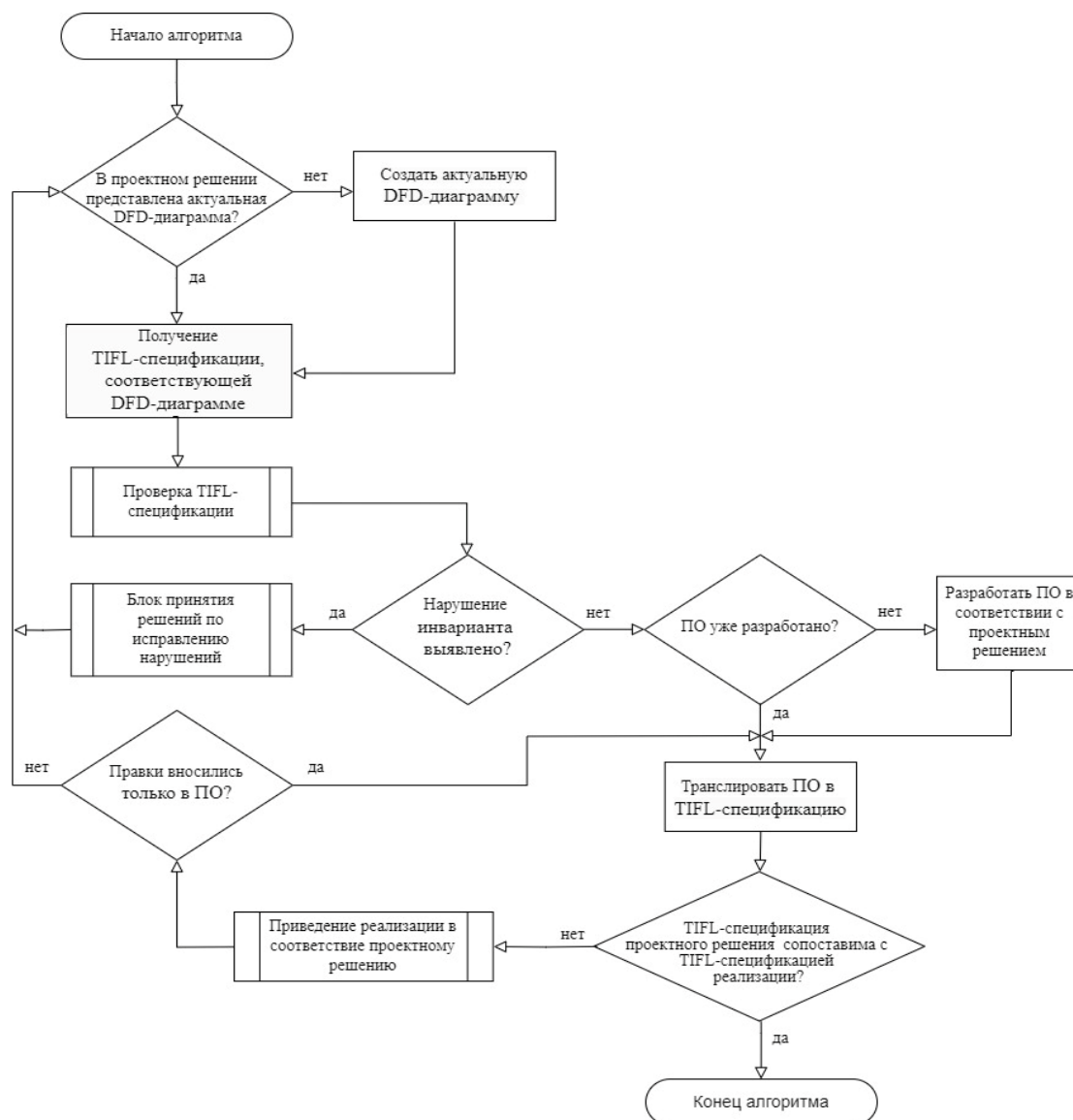


Рис. 1. Схема алгоритма поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении СТС

Источник: выполнено В.В. Алексеевым, Д.А. Ивановым, И.Г. Рыжовым

² Trivial Information Flow Language (TIFL). URL: <https://github.com/IlyaRyzhov/tifl2tla> (accessed: 27.11.2024).

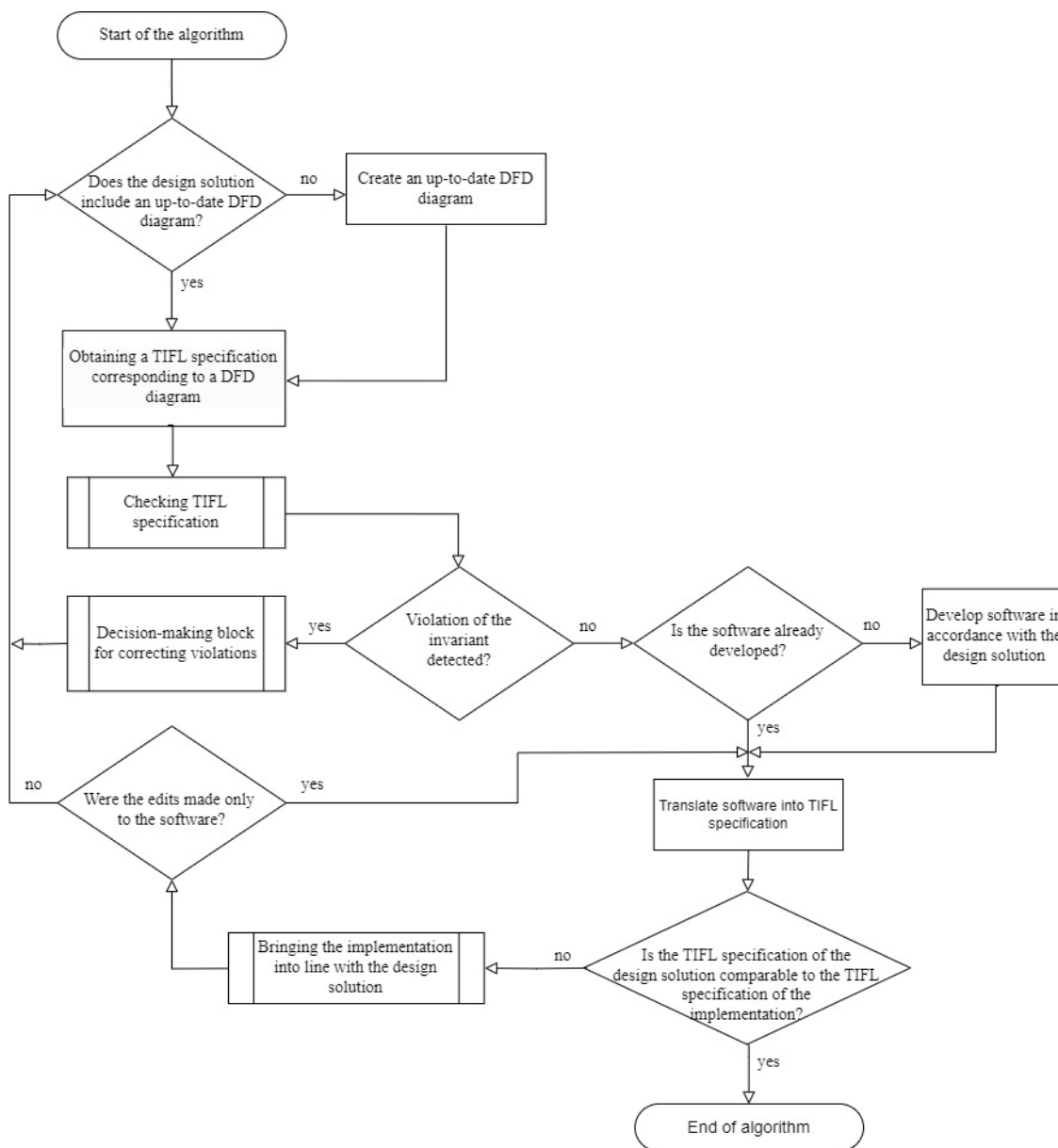


Figure 1. Flowchart of the algorithm for identifying logical errors in the design solution and software of a complex technical system

Source: by V.V. Alekseev, D.A. Ivanov, I.G. Ryzhov

В случае нарушения инварианта по траектории перемещения информации, полученной в результате работы TLC, можно отследить логические ошибки в проектном решении СТС. В качестве решений по исправлению нарушений, исходя из предположения о корректности работы утилиты трансляции *tifl2tla* и соответствия DFD-диаграммы TIFL-спецификации, может быть внесение правок в проектное решение или в спецификацию (в случае ложно-

положительного нарушения инварианта) и соответствующую ей DFD-диаграмму. Если изменениям подверглось проектное решение, то необходимо произвести актуализацию DFD-диаграммы с последующей генерацией спецификаций. После модификации спецификаций вне зависимости от принятого решения необходимо выполнить повторный запуск TLC.

Если же нарушений инварианта не выявлено, то проектное решение системы не содер-

жит логических ошибок, приводящих к нарушению параметров информационных потоков. В таком случае для систем, в которых отсутствует ПО, соответствующее проектному решению, разрешается приступить к его разработке.

Разработанное (для анализа вновь создаваемых систем) или существующее (для анализа эксплуатируемых систем) ПО необходимо транслировать в TIFL-спецификацию.

Особенностью этапа перевода на язык TIFL является то, что он происходит с учетом абстрагирования от реальных вычислений в системе. При описании информационных потоков на языке TIFL рекомендуется использовать как можно меньшее число локальных переменных. Так, например, вместо занесения суммы переменных a и b в локальную переменную c и последующей передачи этой переменной получателю информационного потока r можно сразу описать передачу информационному потоку r последовательности переменных a и b . Тем не менее необходимо с осторожностью подходить к объединению информационных потоков и учитывать допустимость отсутствия

атомарности процесса, который будет иметь объединенный выходной информационный поток, в реализованной системе. Возможное влияние подобных способов описания спецификаций на точность анализа наличия логических ошибок в программном обеспечении СТС и разрешенные преобразования над спецификациями для приведения их к некоторому нормальному виду (процедура нормализации) требуют отдельных исследований и в данной статье не рассматриваются.

Представленный для демонстрации выразительности языка TIFL фрагмент программы (рис. 2) получен из фрагмента программы на языке Oracle/PLSQL (рис. 3):

– исключением синтаксических конструкций, которые не порождают информационные потоки и не добавляют условия для их возникновения;

– заменой описаний вычислений над строковыми и числовыми типами данных описаниями информационных потоков, представленных с помощью меток, соответствующих переменным и литералам, участвующим в вычислениях.

```
IncomeLevel -> {
    <g::employees.monthly_income><g::employees.name, p::name_in?-><l::monthly_value>;
    (l::monthly_value, const) ? {
        <const> -> <l::Ilevel>;
    } : (l::monthly_value, const) ? {
        <const> -> <l::Ilevel>;
    } : (l::monthly_value, const) ? {
        <const> -> <l::Ilevel>;
    } : {
        <const> -> <l::Ilevel>;
    };
    ->l::Ilevel;
}
```

Рис. 2. Фрагмент программы на языке TIFL, соответствующий коду на рис. 3

Источник: выполнено В.В. Алексеевым, Д.А. Ивановым, И.Г. Рыжовым

Figure 2. Program excerpt in the TIFL language corresponding to the code in Figure 3

Source: by V.V. Alekseev, D.A. Ivanov, I.G. Ryzhov

```

CREATE OR REPLACE Function IncomeLevel ( name_in IN varchar2 ) RETURN varchar2
IS
    monthly_value number(6);
    ILevel varchar2(20);
    cursor c1 is SELECT monthly_income FROM employees WHERE name = name_in;
BEGIN
    open c1;
    fetch c1 into monthly_value;
    close c1;
    IF monthly_value <= 4000 THEN
        ILevel := 'Low Income';
    ELSIF monthly_value > 4000 and monthly_value <= 7000 THEN
        ILevel := 'Avg Income';
    ELSIF monthly_value > 7000 and monthly_value <= 15000 THEN
        ILevel := 'Moderate Income';
    ELSE
        ILevel := 'High Income';
    END IF;
    RETURN ILevel;
END;

```

Рис. 3. Фрагмент программы на языке Oracle/PLSQL

Источник: составлено по Oracle/PLSQL

Figure 3. Program excerpt in Oracle/PLSQL language

Source: compiled by Oracle/PL SQL

ORACLE PL/SQL. Базы данных. IF-THEN-ELSE ОПЕРАТОР. URL: <https://oracleplsql.ru/if-then-else.html> (accessed: 27.11.2024).

Теперь, когда получены проверенная TIFL-спецификация проектного решения СТС и не проверенная TIFL-спецификация фактической реализации ПО, необходимо убедиться, что программная реализация соответствует проектному решению СТС. Для этого выполняется сопоставление TIFL-спецификаций, включающее процесс нормализации спецификаций.

Если спецификации на языке TIFL сопоставимы, то считается, что реализация соответствует проектному решению СТС и не содержит логических ошибок, приводящих к нарушению параметров информационных потоков. В противном случае необходимо привести реализацию в соответствие проектному решению.

На этапе приведения реализации в соответствие проектному решению могут как изменяться программная реализация, так и корректироваться проектное решение СТС. Если правки вносились только в ПО, то нужно заново транслировать ПО в TIFL-спецификацию и повторить шаг сопоставления TIFL-спецификаций.

Однако если в ходе приведения реализации в соответствие проектному решению подвер-

глось изменению проектное решение, то необходимо перейти к шагу актуализации DFD-диаграммы.

Работа алгоритма завершается, когда TIFL-спецификации проектного решения и ПО будут считаться сопоставимыми.

3. Обсуждение

Разработанный алгоритм поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении СТС рекомендуется применять для обеспечения живучести совместно с другими существующими подходами, обеспечивающими живучесть, позволяющими обнаруживать логические ошибки в ПО (например, статический и динамический анализы [4; 5]), и подходами, сфокусированными на поиск ошибок в проектных решениях (например, дедуктивной верификацией потоков, представленных в DFD [7]).

Для автоматизации написания TLA⁺-спецификаций в [6] использована утилита [19], ориентированная на работу с программными блоками баз данных, написанными на языке

Oracle/PLSQL, что дополнительно ограничивает совершенствование подхода развитием вендорской технологии. Использование доменно-специфичного языка TIFL и утилиты трансляции `tifl2tla` в алгоритме, представленном в данной статье, позволяет не только упростить процесс получения TLA⁺-спецификаций, но и абстрагироваться от использованных в реализации CTC технологий. Такое абстрагирование дает возможность независимо развиваться утилитам трансляции, доменно-специфичному языку TIFL и самому подходу к обеспечению живучести CTC.

Алгоритм поиска логических ошибок в проектном решении и программном обеспечении CTC, как и подходы, представленные в [14; 15], обнаруживает ошибки в проектном решении и программном обеспечении CTC, а также обеспечивает согласованность проектного решения и варианта реализации системы, но отличается использованием метода верификации моделей *model checking*, лежащего в основе алгоритма, который исчерпывающе проверяет пространство состояний модели системы [13].

Определение эффективности предложенного в данной статье алгоритма требует оценки живучести CTC. С точки зрения проведения оценки живучести интерес представляют подходы, описанные в [20–23].

Снижения сложности внедрения алгоритма в процесс создания систем и повышения удобства использования алгоритма можно достичь за счет автоматизации шагов алгоритма. Авторы видят наиболее приоритетными для автоматизации шаги создания актуальной DFD-диаграммы и TIFL-спецификаций, соответствующих DFD-диаграмме и ПО.

Для автоматизации создания DFD-диаграмм, соответствующих словесно сформулированным требованиям, перспективным выглядит использование больших языковых моделей с помощью метода RAG [24].

Автоматизация создания TIFL-спецификации, соответствующей DFD-диаграмме, может быть выполнена посредством специально разрабатываемого редактора, сохраняющего по-

строенные диаграммы в виде TIFL-спецификаций и позволяющего отобразить визуально TIFL-спецификации.

TIFL-спецификацию, соответствующую ПО, следует получать автоматизированно, применяя утилиты трансляции, подобные [19], для исходных кодов, написанных на различных языках программирования.

Заключение

Определен подход и создан алгоритм, позволяющий обеспечивать живучесть CTC в специальных условиях. В ходе исследования установлено, что проблемами с точки зрения обеспечения живучести для CTC являются логические ошибки в требованиях и их реализации. В результате на основе анализа существующих подходов к обнаружению логических ошибок разработан алгоритм, базирующийся на темпоральной логике, который позволяет своевременно обнаруживать такие ошибки и способствует их дальнейшему устранению, тем самым обеспечивая живучесть системы. Данный алгоритм целесообразно применять на этапах проектирования, ввода в действие и сопровождения систем.

Дальнейшие исследования авторы видят в следующей очередности:

- 1) определение необходимой степени абстракции проверяемых моделей и влияние композиции моделей на точность анализа;
- 2) выбор подходящей DFD-нотации для построения моделей и разработка алгоритма сопоставления TIFL-спецификаций;
- 3) разработка алгоритма поддержки принятия решений по исправлению нарушений инварианта и устранению несоответствия реализации проектному решению;
- 4) определение эффективности предлагаемого в статье алгоритма посредством сравнения оценок живучести до и после его применения;
- 5) повышение уровня автоматизации шагов алгоритма, простоты внедрения алгоритма и удобства его использования.

Список литературы

1. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем : методы анализа. Ульяновск : Печатный двор, 2012. 296 с. ISBN: 978-5-7572-0327-0 EDN: QMXPUD
2. Гутгарц Р.Д. Особенности проектирования и программирования при создании информационных систем // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 3. С. 385–395. <https://doi.org/10.15827/0236-235x.131.385-395> EDN: MQLBTZ
3. Белов А.С., Добрышин М.М., Горшков А.Н., Шугуров Д.Е. Предложение по определению эксплуатационной надежности программного обеспечения сложных технических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 143–148. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-143-148> EDN: LUVYDO
4. Воронникова Т.Ю. Надежный код : статический анализ программного кода как средство повышения надежности программного обеспечения информационных систем // Информационные технологии в УИС. 2020. № 2. С. 22–27. EDN: YUTHON
5. Аветисян А.И., Белеванцев А.А., Чукляев И.И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 20–28. EDN: SSYPXV
6. Тимаков А.А. Контроль информационных потоков в программных блоках баз данных на основе формальной верификации // Программирование. 2022. № 4. С. 27–49. <https://doi.org/10.31857/S0132347422040057> EDN: WEMCXC
7. Seifermann S., Heinrich R., Werle D., Reussner R. Detecting violations of access control and information flow policies in data flow diagrams // Journal of Systems and Software. 2022. Vol. 184. P. 111138. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111138> EDN: QLGGWA
8. DeMarco T. Structured analysis and system specification // Pioneers and Their Contributions to Software Engineering / M. Broy, E. Denert (eds.). Springer Berlin Heidelberg, 1979. P. 255–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_9
9. Warren D.S. Introduction to prolog. Prolog: The Next 50 Years. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. P. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35254-6_1
10. Tuma K., Scandariato R., Balliu M. Flaws in flows: Unveiling design flaws via information flow analysis // 2019 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA). IEEE, 2019. P. 191–200. <https://doi.org/10.1109/ICSA.2019.00028>
11. Каннер А.М. Применение TLA+ нотации для описания модели изолированной программной среды субъектов доступа и ее дальнейшей верификации // Вопросы защиты информации. 2021. № 3. С. 8–11. https://doi.org/10.52190/2073-2600_2021_3_8 EDN: KXLLGD
12. Lamport L. Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers. Boston : Addison–Wesley Publ.; 2002. 364 с. ISBN: 032114306X, 9780321143068
13. Капнов Ю.Г. Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 560 с. ISBN: 978-9775-0404-1
14. Tuma K., Peldszus S., Strüder D., Scandariato R., Jürjens Ja. Checking security compliance between models and code // Software and systems modeling. 2023. Vol. 22. No. 1. P. 273–296. <https://doi.org/10.1007/s10270-022-00991-5> EDN: QYOWHY
15. Peldszus S. Security Compliance in Model-Driven Software Development // Ernst Denert Award for Software Engineering 2022: Practice Meets Foundations. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 73–104. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44412-8_4
16. Коленченко Ю.В., Петров К.А., Емельянов Д.М., Исмаилов И.Р. Разработка приложения-агента для предотвращения утечек чувствительной информации // Тинчуринские чтения-2020. Энергетика и цифровая трансформация. 2020. С. 64–67. EDN: GKLNCM
17. Wąsowski A., Berger T. Domain-Specific Languages. Springer International Publ.; 2023. 486 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23669-3>
18. Krausz M., Peldszus S., Regazzoni F., Berger T., Güneysu T. 120 Domain-Specific Languages for Security. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2408.06219> (accessed: 12.09.2024)
19. Тимаков А.А., Рыжов И.Г., Лысиков А.В. Генерация TLA+ спецификаций на основе программных блоков баз данных / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023612260, 01.02.2023. Заявка № 2022686671 от 30.12.2022. EDN: JPAFW
20. Yakovlev A.V., Alekseev V.V., Volchikhina M.V., Petrenko S.V. A Combinatorial Model for Determining Information Loss in Organizational and Technical Systems // Mathematics. 2022. Vol. 10. No. 19. P. 3448. <https://doi.org/10.3390/math10193448> EDN: ZFYIJS
21. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47–66. EDN: MEGOYJ
22. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О., Виноградов В.В. Анализ функциональной живучести структурно-сложных технических систем // Надежность. 2018. Т. 18. № 2. С. 17–24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-2-17-24> EDN: USQARX
23. Алымов Н. Некоторые вопросы оценки живучести технических систем // Инфокоммуникационные

технологии: актуальные вопросы цифровой экономики : сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2021. С. 188–192. EDN: VEKBVC

24. Zhao S., Yang Y., Wang Z., He Zh., Qiu L.K., Qiu L. Retrieval augmented generation (RAG) and beyond: A comprehensive survey on how to make your llms use external data more wisely. URL: <https://arxiv.org/html/2409.14924v1> (accessed: 12.09.2024).

References

1. Shubinsky IB. *Functional reliability of information systems. Methods of analysis*. Ulyanovsk: Pechatny Dvor Publ.; 2012. (In Russ.) ISBN: 978-5-7572-0327-0 EDN: QMXPUD

2. Gutgarts RD. Features of design and programming when creating information systems. *Software products and systems*. 2020;33(3):385–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235x.131.385-395> EDN: MQLBTZ

3. Belov AS. et al. Proposal for determining the operational reliability of software of complex technical systems. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2022;(9):143–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-143-148> EDN: LUVYDO

4. Vorotnikova TYu. Reliable code: static analysis of program code as a means of increasing the reliability of software for information systems. *Information technologies in the UIS*. 2020;(2):22–27. (In Russ.) EDN: YYTHON

5. Avetisyan AI, Belevantsev AA, Chuklyaev II. The technologies of static and dynamic analyses of detecting software vulnerabilities. *Cybersecurity Issues*. 2014;3(4): 20–28. (In Russ.) EDN: SSYPXV

6. Timakov AA. Control of information flows in software blocks of databases based on formal verification. *Programming and Computer Software*. 2022;48(4):265–285. <https://doi.org/10.1134/s0361768822040053> EDN: BATUIZ

7. Seifermann S, Heinrich R, Werle D, Reussner R. Detecting violations of access control and information flow policies in data flow diagrams. *Journal of Systems and Software*. 2022;184:111138. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111138> EDN: QLGGWA

8. DeMarco T. *Structured analysis and system specification*. In: Broy, M., Denert, E. (eds.) *Pioneers and Their Contributions to Software Engineering*. Springer Berlin Heidelberg; 1979. P. 255–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_9

9. Warren DS. Introduction to prolog. *Prolog: The Next 50 Years*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2023. P. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35254-6_1

10. Tuma K, Scandariato R, Balliu M. Flaws in flows: Unveiling design flaws via information flow analysis. *2019 IEEE International Conference on Software Archi-*

tecture (ICSA). 2019. p. 191–200. <https://doi.org/10.1109/ICSA.2019.00028>

11. Kanner AM. Application of TLA+ notation to describe the model of an isolated software environment of access subjects and its further verification. *Information Security Issues*. 2021;(3):8–11. https://doi.org/10.52190/2073-2600_2021_3_8 EDN: KXLLGD

12. Lamport L. *Specifying systems: the TLA+ language and tools for hardware and software engineers*. Boston: Addison-Wesley Publ.; 2002. ISBN 032114306X, 978-0-32114-306-8

13. Karpov YuG. *Model checking. Verification of parallel and distributed software systems*. SPb.: BHV-Petersburg; 2010. (In Russ.) ISBN 978-9775-0404-1

14. Tuma K, Peldszus S, Strüber D, Scandariato R, Jürjens Ja. Checking security compliance between models and code. *Software and systems modeling*. 2023;22(1): 273–296. <https://doi.org/10.1007/s10270-022-00991-5> EDN: QYOWHY

15. Peldszus S. Security Compliance in Model-Driven Software Development. *Ernst Denert Award for Software Engineering 2022: Practice Meets Foundations*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2024. p. 73–104. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44412-8_4

16. Kolenchenko YuV, Petrov KA, Yemelyanov DM, Ismagilov IR. Development of an agent application to prevent leaks of sensitive information. *Tinchurin readings-2020. Energy and digital transformation*. 2020:64–67. (In Russ.) EDN: GKLNCM

17. Wąsowski A, Berger T. *Domain-Specific Languages*. Springer International Publ.; 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23669-3>

18. Krausz M, Peldszus S, Regazzoni F, Berger T, Güneysu T. *120 Domain-Specific Languages for Security*. 2024. Available from: <https://arxiv.org/abs/2408.06219> (accessed: 12.09.2024)

19. Timakov AA, Ryzhov IG, Lysikov AV. *Certificate of state registration of computer program No. 2023612260 Russian Federation*. Generation of TLA+ specifications based on program blocks of databases: No. 2022686671: declared 30.12.2022: published 01.02.2023.

20. Yakovlev AV, Alekseev VV, Volchikhina MV, Petrenko SV. A Combinatorial Model for Determining Information Loss in Organizational and Technical Systems. *Mathematics*. 2022;10(19):3448. <https://doi.org/10.3390/math10193448> EDN: ZFYIJS

21. Makhutov NA, Petrov VP, Reznikov DO. Assessment of survivability of complex technical systems. *Problems of safety and emergency situations*. 2009;(3): 47–66. (In Russ.) EDN: MEGOYJ

22. Cherkosov GN, Nedosekin AO, Vinogradov VV. Analysis of the functional survivability of structurally

complex technical systems. *Reliability*. 2018;18(2):17–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-2-17-24> EDN: USQARX

23. Alymov N. Some issues of assessing the survivability of technical systems. *Infocommunication technologies: current issues of the digital economy. Collection of scientific papers of the I International Scientific and*

Practical Conference. Ekaterinburg: Reliability; 2021. p. 188–192. (In Russ.) EDN: VEKBVC

24. Zhao S, Yang Y, Wang Z, He Zh, Qiu LK, Qiu L. *Retrieval augmented generation (rag) and beyond: A comprehensive survey on how to make your llms use external data more wisely*. 2024. Available from: <https://arxiv.org/html/2409.14924v1> (accessed: 12.09.2024)

Сведения об авторах

Алексеев Владимир Витальевич, доктор технических наук, профессор кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9320-9713, ORCID: 0000-0002-0398-4426; e-mail: vvalex1961@mail.ru

Иванов Дмитрий Александрович, 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: 4761-2024, ORCID: 0009-0004-0182-5095; e-mail: 1142230113@pfur.ru

Рыжов Илья Геннадьевич, 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: 1818-9990, ORCID: 0000-0001-6014-6982; e-mail: ryzhov.ilgen@gmail.com

About the authors

Vladimir V. Alekseev, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9320-9713, ORCID: 0000-0002-0398-4426; e-mail: vvalex1961@mail.ru

Dmitry A. Ivanov, 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: 4761-2024, ORCID: 0009-0004-0182-5095; e-mail: 1142230113@pfur.ru.

Ilya G. Ryzhov, 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: 1818-9990, ORCID: 0000-0001-6014-6982; e-mail: ryzhov.ilgen@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-168-180

EDN: MBIJVQ

Research article / Научная статья

Machine Learning Methods for Predicting Cardiovascular Diseases: A Comparative Analysis

Aiym B. Temirbayeva[✉], Arshyn Altybay^{ID}

Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan

✉ aiymtemirbaeva@gmail.com

Article history

Received: December 11, 2024

Revised: February 14, 2025

Accepted: February 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The study aims to accurately predict the presence of heart disease using machine learning models. The research evaluates and compares the performance of five algorithms — Logistic Regression, Support Vector Machine (SVM), Decision Tree, Random Forest, and Gradient Boosting — on a dataset containing clinical features of patients. The primary research question is to identify which algorithm demonstrates the best predictive performance for heart disease diagnosis. The study used a dataset of 270 patients with 13 clinical features. The data was preprocessed, and target variables were converted into binary values for classification. The dataset was split into training and test sets in a 70–30 ratio. Five machine learning models were trained and evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, and ROC-AUC. Confusion matrices were analyzed to gain additional insights into model performance. Logistic Regression and Random Forest showed the best results among all models, with an accuracy of 86.4 and 80.2%, respectively. The Logistic Regression showed a ROC-AUC score of 0.844, while the Random Forest showed a score of 0.88. The confusion matrices revealed the strengths and weaknesses of each model in terms of forecasting. Logistic Regression and Random Forest were identified as the most reliable models for predicting heart disease in this dataset. Future work will explore hyperparameter tuning and ensemble methods to further enhance model performance, providing valuable insights for early diagnosis and treatment of cardiovascular diseases.

Keywords: Random Forest, support vector machine, gradient boosting, decision tree, Logistic Regression, accuracy

Authors' contribution

Temirbayeva A.B. — writing – original draft, visualization, validation; Altybay A. — methodology, investigation, validation.

For citation

Temirbayeva AB, Altybay A. Machine learning methods for predicting cardiovascular diseases: A comparative analysis. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):168–180. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-168-180>



Методы машинного обучения для прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний: сравнительный анализ

А.Б. Темирбаева[✉], А. Алтыбай^{id}

Астанинский IT-университет, Астана, Республика Казахстан

✉ aiymtemirbaeva@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 11 декабря 2024 г.

Доработана: 14 февраля 2025 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Цель исследования — точное предсказание наличия сердечно-сосудистых заболеваний с помощью моделей машинного обучения. Оценивалась и сравнивалась эффективность пяти алгоритмов: логистической регрессии, машины опорных векторов, дерева решений, случайного леса и градиентного бустинга на наборе данных, содержащем клинические характеристики пациентов. Определялось, какой из алгоритмов демонстрирует наилучшие прогностические характеристики для диагностики заболеваний сердца. Использован набор данных 270 пациентов с 13 клиническими признаками. Данные были предварительно обработаны, а целевые переменные преобразованы в бинарные значения для классификации. Набор данных был разделен на обучающий и тестовый в соотношении 70–30. Пять моделей машинного обучения были обучены и оценены с помощью таких метрик, как точность, recall, precision, F1-score и ROC-AUC. Для получения дополнительной информации о производительности моделей были проанализированы матрицы ошибок. В результате логистическая регрессия и случайный лес показали наилучшие результаты среди всех моделей с точностью 86,4 и 80,2 %, соответственно. Логистическая регрессия продемонстрировала ROC-AUC на уровне 0,844, а случайный лес — 0,88. С помощью матриц путаницы выявлены прогностические достоинства и недостатки каждой модели. Авторами сделаны следующие выводы: логистическая регрессия и случайный лес были определены как наиболее надежные модели для прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний в этом наборе данных. В дальнейшем планируется изучение методов настройки гиперпараметров и ансамбля для повышения эффективности моделей, что позволит получать ценные сведения для ранней диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова: случайный лес, машина опорных векторов, градиентное усиление, дерево решений, логистическая регрессия, точность

Вклад авторов

Темирбаева А.Б. — написание исходного текста, визуализация, валидация; Алтыбай А. — методология исследования, валидация.

Для цитирования

Temirbayeva A.B., Altybay A. Machine learning methods for predicting cardiovascular diseases: A comparative analysis. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 168–180. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-168-180>

Introduction

Cardiovascular diseases (CVDs) cast a long shadow around the world, claiming millions of lives every year. CVDs are the leading cause of death worldwide, claiming an estimated 17.9 million lives

in 2019 [1]. This translates to one person dying every 34 s because of CVD. In Kazakhstan, the situation is similar, with a high prevalence of CVDs. The prevalence of CVDs among the population increased from 1845.4 per 100,000 people in 2004 to 2597.5 per 100,000 people by 2017 [2]. These

statistics emphasize the urgent need for improved methods of diagnosis, treatment, and prevention. Fortunately, advances in artificial intelligence (AI) have offered promising solutions that may prove particularly effective. Traditional diagnostic methods for heart disease can be subjective and prone to human error. AI algorithms excel at analyzing complex medical images, such as echocardiograms, potentially leading to more accurate diagnosis. A recent study published in *Nature* demonstrated an AI framework's ability to effectively classify cardiac diseases using audio signals [3]. AI can be used to analyze an individual's specific medical data, including demographics, lifestyle factors, and genetic information. This personalized approach allows for tailored risk assessments and treatment plans, potentially leading to better patient outcomes. Early detection is crucial for improving the outcome of heart disease. The AI-powered analysis of various data points, including electrocardiograms (ECGs), heart sounds, and electronic health records, has shown promise in identifying patterns and predicting the likelihood of developing heart disease. Studies suggest that machine learning (ML) models, particularly Random Forests (RF), can achieve high accuracy rates (approximately 90%) in heart disease prediction [4]. This research hypothesizes that ML algorithms, when trained on a diverse dataset of patient attributes, can effectively learn patterns associated with heart disease risk and achieve high levels of predictive accuracy. Additionally, it is hypothesized that certain algorithms may outperform others in terms of predictive performance depending on the characteristics of the dataset and the complexity of the underlying relationships. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effectiveness of ML algorithms in predicting the risk of heart disease based on various patient attributes. By analyzing a dataset containing features related to patient demographics, medical history, and diagnostic tests, the aim is to develop models that can accurately classify individuals as either having a high risk of heart disease. The objectives of this research were to preprocess and analyze a dataset containing features relevant to heart disease prediction and evaluate

multiple ML algorithms for heart disease classification. The performance of the developed models was assessed using key performance indicators, such as accuracy, recall, and ROC AUC, to compare the effectiveness of different ML algorithms in predicting heart disease risk. In conclusion, with heart disease statistics painting a concerning picture, AI-powered methods for analysis and classification offer significant potential. Early detection, improved diagnostics, and personalized medicine facilitated by ML hold the promise of revolutionizing cardiac care, ultimately saving lives, and improving overall heart health.

Background and Related Work. Heart disease, which includes a variety of disorders affecting the heart and blood arteries, continues to be a major global health problem owing to its high prevalence, morbidity, and mortality rates. Early identification and precise risk assessment are critical for the effective prevention and management of cardiovascular disorders. In recent years, ML techniques have received increased attention in the healthcare profession due to their potential to aid in disease prediction and diagnosis. Several researchers have investigated the use of ML algorithms to forecast the risk of heart disease using various datasets and approaches. For instance, [5] aimed to create a novel end-to-end technique for detecting and classifying heart-sound abnormalities that can be applied to a variety of heart-sound diagnosis activities. They created a Multi-feature Decision Fusion Network (MDFNet) composed of two modules: Multi-dimensional Feature Extraction (MFE) and Multi-dimensional Decision Fusion (MDF). This approach was applied to two datasets, which are open-access databases of heart-sound recordings. There were four experiments with an overall accuracy of 94.44% and an F1-score of 86.90% for the binary classification task and 99.30% for the five-classification task. This technology surpassed other cutting-edge methods and showed promising therapeutic applications. CVDs remain a constant threat in areas with low resources and moderate incomes. [6] Other researchers have used deep learning techniques to reveal a model that is enhanced by bispectrum-inspired feature extraction and the Vision Trans-

former (ViT) model's cutting-edge capabilities. This paradigm leads to the binary classification of cardiac sounds as 'normal' or 'abnormal.' Their algorithm relies on data from the PhysioNet Challenge 2022 database, which contains 3163 data points from 942 patients. The model demonstrates an excellent classification process with impressive consistency, particularly when distinguishing between pregnant and non-pregnant individuals' heart sounds. The model described in this work, which employs bispectrum for feature extraction and the ViT model for classification, achieves an accuracy of 0.91 and an AUC of 0.98 in the test set drawn from the PhysioNet Challenge 2016 and 2022 databases. This study [7] applied ML to classify cardiovascular disorders accurately. The authors used Naive Bayes, RF, Decision Tree, and Multilayer Perceptron algorithms to combine predictions using the Bagging process, which is being investigated as a way to improve the accuracy of less accurate algorithms. Bagging, boosting, voting, and stacking are among the ensemble methods employed. The study used UCI's Cleveland heart dataset (CHD) for people with heart disease. This dataset contained 303 occurrences and only 14 attributes. Consequently, the accuracy of the ensemble approach utilizing boosting and bagging was superior to that of the individual classifiers. The initial accuracy of the RF algorithm was 81.53%. Upon incorporating the feature selection, the accuracy increased to a maximum of 90.52%. The Multilayer Perceptron method increased significantly from 78.52 to 96.18%. The findings highlight the importance of critical feature selection in increasing the accuracy of the models. They were able to reduce noise and concentrate on the main risk factors for cardiovascular disease by choosing the most pertinent attributes, which led to more precise forecasts. The study demonstrates that feature selection and ensemble classification algorithms can greatly increase the accuracy of cardiac disease risk prediction. [8] employed the *K*-nearest neighbors (KNN) algorithm to handle classification problems related to coronary heart disease. There are six forms of coronary heart disease, however only two were selected for classi-

fication. These include angina pectoris (AP) and acute myocardial infarction (AMI). The CHD dataset was obtained from the National Center for Health Statistics (NCHS) and reviewed by the medical team at the Center for Specialty Cardiology. The dataset for this study consisted of 100 case histories of CHD patients. Following the analysis, the data was separated into training and test data-sets, with the training features containing 80 records (80% of the data) and the test features containing 20 records (20% of the data). Two distinct datasets were created: Boolean values (D1), and values consisting of twos within a certain range (D2). The primary goal is to compare the F1-score diagnostic levels and choose the most appropriate one.

As a result, by selecting a random value of *k* equal to 5 for D1 data, the *k*-nearest neighbors algorithm achieves an accuracy of 93%, outperforming some experiments with ML methods, such as RF, Support Vector Machine (SVM), Naive Bayes (NB), and Logistic Regression. However, the same *k* value for D2 data resulted in a lower accuracy of 76%. The experimental results showed that for coronary heart disease classification, the D1 dataset produced better F1-score results of 92 and 94% compared to the D2 dataset of 70 and 81%, respectively, using the KNN algorithm. This shows that Boolean attributes can be an effective dataset for categorization. As technology and medical diagnostics become more integrated, data mining and the storage of medical information can improve patient care. Therefore, it is critical to investigate the interrelation of risk factors in patients' medical histories and comprehend their individual contributions to cardiovascular disease prognosis. Another study aimed to analyze numerous components of patient data to accurately forecast heart illnesses [9]. The most important qualities for predicting heart disease were discovered utilizing a correlation-based subset feature selection and a best-fit search approach. Age, sex, smoking, obesity, food, physical activity, stress, type of chest pain, previous chest pain, diastolic blood pressure, diabetes, tro-ponin, ECG, and aim were identified as the most important factors in the diagnosis of

heart disease. Consequently, data were gathered from hospitals, diagnostic centers, and clinics throughout Bangla-desh. The patients were questioned, analytical results were evaluated, and information on essential cha-racteristics was gathered. The dataset consisted of test results from 59 patients and their responses to various questionnaires. The data were separated into two parts: training data (67%) and test data (33%). Various AI approaches (e.g., Logistic Regression, Naive Bayes, K-NN, SVM, decision tree, RF, and MLP) were tested for two types of heart disease datasets (all and chosen features). RF with selected features achieved 90% accuracy, 90.91% precision, 100% recall, 90.91% F1-score, and 89.90% ROC-AUC, the highest among the AI approaches. The proposed method can be utilized to assist in the early diagnosis of heart disease. Audio-based heart disease detection is an exciting research topic that uses the audio signals produced by the heart to detect and diagnose cardiovascular disorders. ML and deep learning (DL) are important techniques for classifying and identifying cardiac disorders using acoustic inputs [3]. Evaluated ML and DL algorithms for detecting cardiac disorders using noisy audio input. This study used two subsets of the Pascal Challenge datasets, which contained real cardiac audio signals from 400 participants. Spectrograms and Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) were used to process and visualize the signals throughout the study. To improve the model performance, we used data aug-mentation, which involves inserting synthetic noise into heartbeat signals. In addition, a feature en-semble was created to combine various sound feature extraction approaches. Several machine-learning and deep-learning classifiers have been used to diagnose cardiac diseases. The multilayer perceptron model outperformed the other models and earlier experiments with an accuracy of 95.65%. This study revealed how this technology can accurately diagnose cardiac problems using acoustic signals. This study [10] evaluated the performance of seven machine-learning algorithms for heart disease diagnosis using a dataset consisting of 4,238 records and 16 patient characteristics. The algo-

ri thms tested were Naive Bayes, decision trees (DT), RF, SVM, artificial neural networks (ANN), KNN, and Logistic Regression (LR). The results showed a significant difference in accuracy between the models. The LR model showed the highest accuracy (85.5%), followed by RF (83.9%) and artificial neural networks (83.7%). The K-nearest neighbors algorithm also performed well, with an accuracy of 83.4%, but its accuracy was slightly lower than that of the RF and ANN models. The decision tree models achieved an accuracy of 79.9%, surpassing Naive Bayes and SVM, which showed lower accuracy values of 78.9% and 70.9%, respectively. These results highlight the potential of ML algorithms for improving the diagnosis of heart disease, with the LR, RF, and ANN models performing the best for accurate predictions. It is evident that the KNN and DT models hold some value in this context, though it should be noted that their performance lags slightly behind that of the most effective algorithms.

1. Implemented Algorithm

This study compares the performance of Logistic Regression SVM decision tree, RF and gradient boosting techniques. Decision trees are tree-like structures used to make predictions. They divide the feature space into discrete regions based on feature tests, with each leaf node representing a class label or goal value. Decision trees are simple and easy to understand. RF is an evolution of this concept, which uses several decision trees to increase prediction accuracy and generalization. It generates an ensemble of decision trees from arbitrary subsets of training data and features. Individual tree findings are combined to yield the final prediction [8]. The RF approach extends the summarizing method by combining summarization and feature randomness to generate an uncorrelated forest of decision trees. The randomized feature approach, also known as the bag-of-features method or the “random subspace method” creates a random subset of features with low correlation between decision trees. This is an important distinction between decision trees and RF. While decision trees

analyze all possible feature partitions, RF only select a subset of these features [11]. In contrast, SVM is an efficient algorithm for both classification and regression. SVM is a sophisticated ML technique that can address linear or nonlinear classification, regression, and even outlier identification problems. SVM can be used for a variety of applications, including text classification, picture classification, spam detection, handwriting identification, gene expression analysis, face and anomaly detection [12]. SVMs are versatile and useful in various applications because they can handle high-dimensional data and nonlinear dependencies. SVM algorithms are particularly effective because they attempt to find the largest separation hyperplane among the many classes present in the target feature. LR is a supervised ML algorithm used in classification problems to predict whether an instance belongs to a specific class or not. LR is a statistical procedure that is used to determine the relationship between two data points. It is used for binary classification with a sigmoidal function that treats the input data as independent variables and returns a probability value between 0 and 1 [13]. Gradient boosting is a powerful boosting approach that combines numerous weak training models into strong training models by training each new model

to minimize a loss function, such as the prior model's mean square error or cross-entropy, with gradient descent. At each iteration, the approach calculates the gradient of the loss function with respect to the predictions of the current ensemble, and then trains a new weak model to minimize this gradient. The predictions of the new model are added to the ensemble, and the procedure is repeated until a stopping requirement is met [14].

2. Methodology

2.1. Dataset

This study used a dataset from the University of California Irvine's Machine Learning Repository. It consists of different attributes that are used to predict patients at high risk of heart disease.

The dataset¹ consists of 14 columns and 270 rows. Thirteen of them have integer and decimal data types, whereas only one column is in the string data type. The details of the columns are summarized in Table 1 according to the original data source². After analyzing the dataset, we replaced the values of the "Heart Disease" column with integer values. Thus, the value of "Absence" is 0 and "Presence" is 1. It is necessary to compare the ML methods that focus on this column.

Table 1

Description of dataset

Variable Name	Role	Type	Description
Age	Feature	Integer	Age of the patient
Sex	Feature	Integer	1 = male, 0 = female
Chest Pain Type	Feature	Integer	1 = typical angina; 2 = atypical angina; 3 = non-anginal pain; 4 = asymptomatic
BP	Feature	Integer	Resting blood pressure
Cholesterol	Feature	Integer	Serum cholestoral
FBS over 120	Feature	Integer	Fasting blood sugar > 120 mg/dl
EKG results	Feature	Integer	0 = normal; 1 = having ST-T wave abnormality; 2 = showing probable or definite left ventricular hypertrophy by Estes' criteria
Max HR	Feature	Integer	Maximum heart rate achieved

¹ Damarla R. Heart Disease Prediction. Predicting probability of heart disease in patients. Kaggle. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/rishidamarla/heart-disease-prediction/data> (accessed: 12.09.2024).

² UCI Machine Learning Repository. (n.d.). Available from: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/45/heart+disease> (accessed: 12.09.2024).

Ending of the Table 1

Variable Name	Role	Type	Description
Exercise Angina	Feature	Integer	Exercise induced angina (1 = yes; 0 = no)
ST Depression	Feature	Decimal	ST depression induced by exercise relative to rest
Slope of ST	Feature	Integer	the slope of the peak exercise ST segment: 1 = upsloping; 2 = flat; 3 = downsloping
Number of Vessels Fluro	Feature	Integer	Number of major vessels (0–3) colored by flourosopy
Thallium	Feature	Integer	3 = normal; 6 = fixed defect; 7 = reversable defect
Heart Disease	Target	String	Presence, absence of heart disease

Source: by A.B. Temirbayeva

2.2. Algorithms

The following ML algorithms were implemented and tested to predict the risk of heart disease:

1) *Logistic Regression*: LR is the most common modeling strategy for binary outcomes in epidemiology and medicine³. LR uses a logistic function to calculate the likelihood that an observation belongs to one of two classes.

2) *Support vector machine (SVM)*: The Support Vector Machine algorithm is based on finding the best way to separate hyperplanes between multiple classes. The best hyperplane is often determined by determining the optimal curvature of the hyperplane and maximizing the separation distance between the nearest data points from each class [15].

3) *Decision Tree*: Decision Trees are a set of computational heuristics that solve problems by creating binary splitting rules on data features based on the criterion of maximizing the information acquired from the split [16].

4) *Random Forest*: RF is an ensemble technique that mixes multiple classification trees to generate a prediction based on the majority vote of a single tree. A random subset of the dataset is used to fit each constituent tree with predictors selected at random [17].

5) *Gradient Boosting*: Gradient boosting is an iterative approach for fitting simple statistical models to data. GB models the data using classifier trees, which are simple statistical models. Iteratively,

GB examines the current model's performance, adds another tree to the previous errors, and updates the model by adding the regression tree to the ensemble [18].

Each model was implemented using the scikit-learn library in Python. For each model, hyperparameters were tuned using cross-validation and Grid Search to select the best parameters for training.

2.3. Code

This section consists of the following stages.

1) *Data preparation*: The first step is data cleaning. Raw data often contains noise, errors, or missing values, which can negatively impact the performance of machine-learning models. In our case, we started by loading an initial dataset containing 270 observations and 14 traits, each providing information about the patient's health such as age, sex, cholesterol levels, and other measures. Following data loading, we conducted a check for missing values, which turned out to be non-existent. The column which indicates the presence or absence of cardiovascular disease, was then converted from its original string format ("Absence" "Presence") to a numeric format (0 and 1 respectively). This conversion is a crucial step for the ML algorithms to effectively handle the target variable. Figure 1 shows the actual values of the healthy and unhealthy patients.

³ UCI Machine Learning Repository. (n.d.). Available from: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/45/heart+disease> (accessed: 12.09.2024).

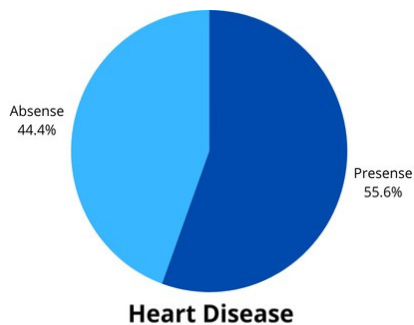


Figure 1. Patients with absence/presence of heart disease
Source: by A.B. Temirbayeva

After these initial steps, we identified the “Heart Disease” column as the target value, the one we aim to predict, and the remaining columns as features that will be used to make those predictions.

2) *Modeling*: After data preparation, the dataset was divided into training and test samples at a ratio of 70:30. The training sample accounted for 70% of the total data and was used to build ML models. The test sample, which accounted for 30% of the data, was used to evaluate the performance of the trained models.

Training set dimension: 189, 13.

Test set dimension: 81, 13.

This separation allowed us to test how well the models could generalize their predictions to new, unseen data. To ensure a comprehensive approach, five diverse ML algorithms were selected and trained to predict the risk of heart disease: Logistic Regression, Support Vector Machine, Decision Tree, Random Forest, and Gradient Boosting. Each model was trained using a training data sample.

3) *Evaluation*: Key accuracy measures were used to evaluate the performance of the trained models. The Confusion Matrix (Confusion Matrix) was used for a more detailed analysis of the model performance. The results were compared after these metrics were obtained.

2.4. Key Performance Indicators

The following Key Performance Indicators were used to evaluate the performance of the trained models:

◆ *Accuracy*: Accuracy was evaluated as the number of correct heart disease predictions divided

by the total number of datasets. The accuracy comparison was based on the performance of the four classification methods.

◆ *Recall*: The proportion of correctly classified positive observations out of the total number of positive observations. Completeness is essential in medical applications, where missed cases must be minimized.

◆ *F1 Score*: Harmonic mean accuracy and completeness. A high F1 score indicated perfect precision and recall of the proposed model.

◆ The Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC-ROC) is an efficiency metric for classification. Utilization of the AUC-ROC metric is a method for evaluating the predictive capacity of the model. The model performs better when the AUC is larger. It can be calculated quantitatively by comparing the True Positive Rate (TPR) against the False Positive Rate (FPR) at various threshold values.

A Confusion Matrix was used to analyze the performance of the models in more detail. The error matrix allows us to visualize how often the model makes mistakes when classifying each class. This includes the following elements:

◆ *True Positives (TP)*: Number of correctly predicted positive cases (cardiac patients correctly classified as sick).

◆ *True Negatives (TN)*: Number of correctly predicted negative cases (patients without heart disease correctly classified as healthy).

◆ *False Positives (FP)*: Number of false predictions of positive cases (patients without heart disease incorrectly classified as sick).

◆ *False Negatives (FN)*: Number of incorrect predictions of negative cases (heart disease patients misclassified as healthy).

3. Results and Discussions

After training the models, key performance indicators were identified for each model. Logistic regression 0.827 and Random Forest 0.79 exhibited the highest accuracy values, indicating their proficiency in accurately classifying most of the samples (Tables 2 and 3).

In particular, logistic regression had the highest ROC AUC 0.844, signifying its superior ability to distinguish between the healthy and diseased classes. The precision, Recall, and F1-Score metrics further support the superiority of Logistic Regression and RF, with both models consistently outperforming the other models. Of note, Logistic Regression achieved a remarkable F1-Score for class 1 (0.81), a key metric in balancing Precision and Recall when identifying patients, underscoring its importance in our analysis.

Gradient boosting (Table 4) had the highest accuracy 0.777 among the three models, followed by the Decision Tree 0.765 and SVM 0.641. The highest ROC AUC 0.75 indicated a superior ability to distinguish between classes compared to the Decision Tree 0.741 and SVM 0.595. With values of Precision 0.78, Recall 0.88, and F1-Score 0.83, it demonstrated a lower performance in predicting healthy patients. The decision tree, while showing comparable results, lagged with Precision 0.78, Recall 0.86 and F1-Score 0.82.

Unfortunately, SVM (Table 5) showed the worst results for class 0, with Precision 0.67, Recall 0.82, and F1-Score 0.73. For class 1, gradient boosting continued to lead with Precision 0.57, Recall 0.38, and F1-Score 0.45, indicating its superior performance in predicting patients with heart disease. As demonstrated in Table 6, the decision tree exhibited lower values for class 1, with Precision 0.75, Recall 0.62 and F1-Score 0.68. SVM showed the worst results for class 1, with Precision 0.57, Recall 0.38, and F1-Score 0.45.

The results of each model were compared across all the key metrics. The graph below summarizes the accuracy scores of each model.

The ROC curve for SVM, but significantly lower than that of Logistic Regression, still demonstrated moderate performance with an AUC of 0.73. The position of the curve further from the top-left corner reflects a lower actual positive rate and a higher false positive rate than the other models. This suggests that SVM, although less effective in distinguishing between patients with and without heart disease, still provides valuable insights.

Table 2

Classification for Logistic Regression

Target	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.81	0.94	0.87	49
1	0.88	0.66	0.75	32
Accuracy	0.827			
ROC AUC	0.797			

Source: by A.B. Temirbayeva

Table 3

Classification for RF

Target	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.78	0.92	0.84	49
1	0.83	0.59	0.69	32
Accuracy	0.790			
ROC AUC	0.756			

Source: by A.B. Temirbayeva

Table 4

Classification for gradient boosting

Target	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.78	0.88	0.83	49
1	0.77	0.62	0.69	32
Accuracy	0.777			
ROC AUC	0.751			

Source: by A.B. Temirbayeva

Table 5

Classification for SVM

Target	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.67	0.82	0.73	49
1	0.57	0.38	0.45	32
Accuracy	0.641			
ROC AUC	0.595			

Source: by A.B. Temirbayeva

Table 6

Classification for decision tree

Target	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.78	0.86	0.82	49
1	0.74	0.62	0.68	32
Accuracy	0.7658			
ROC AUC	0.741			

Source: by A.B. Temirbayeva

The ROC curve for the Decision Tree model, slightly below that of the SVM, with an AUC of 0.74, indicates a similar performance. This balanced comparison suggests that the Decision Tree performs similarly but is slightly worse than the SVM.

The ROC curve for the RF model, a model that consistently shows a high ability to distinguish between classes, with an AUC of 0.89, is a testament to its robust performance. The proximity of the curve to the top left corner indicated good performance in terms of sensitivity and specificity. RF, therefore, not only demonstrates a robust performance but also provides a high level of reliability in predicting heart disease. The ROC curve for Gradient Boosting was similar to that of the RF, with an AUC of 0.88. The model, with its high actual positive rate and low false positive rate, is another strong performer in distinguishing between patients with and without heart disease. The graph of this curve is shown in Figure 2. The error matrix for each model was also calculated and

used to visualize the classification errors. Logistic Regression and RF, with their high performance and low FP and FN values, demonstrated a practical balance between identifying healthy individuals and those with heart disease. Therefore, these models are reliable tools for real-world applications in predicting heart diseases. Gradient Boosting performs well but has slightly higher FP and FN than Logistic Regression and RF. Decision Tree provides moderate performance, with a higher number of FP and FN, indicating it is less reliable than the top models. While SVM shows the weakest performance, with high FP and FN, it is important to note that it may not be suitable for this specific task. This acknowledgement of the limitations of the models underscores the transparency and honesty of our research. Through a comprehensive analysis of the confusion matrix, Logistic Regression and RF have emerged as the top-performing models for predicting heart disease. This comparative approach underscores the credibility and robustness of the findings (Figures 3, 4.)

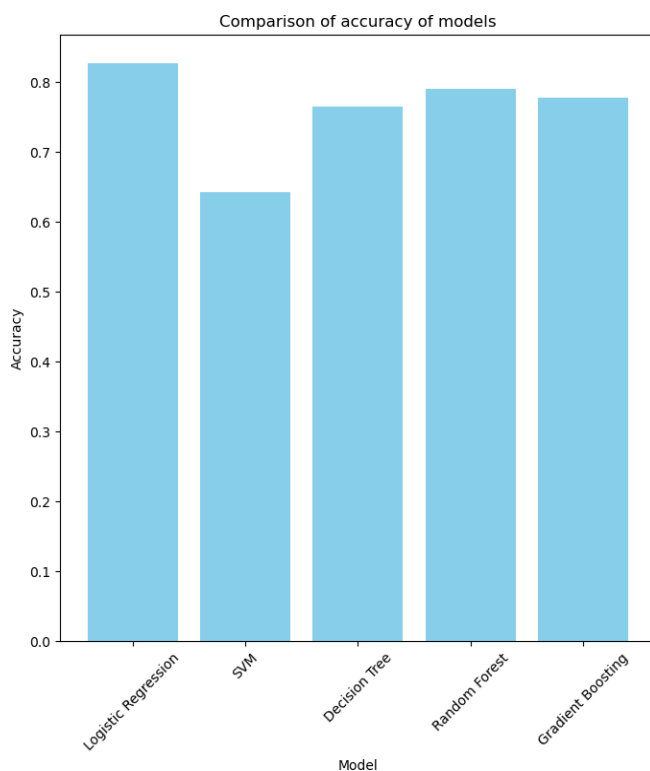


Figure 2. Comparison of accuracy
Source: by A.B. Temirbayeva

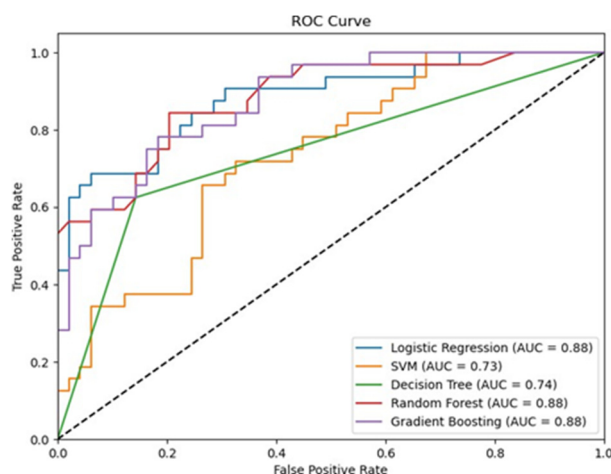


Figure 3. ROC curve for all models
Source: by A.B. Temirbayeva

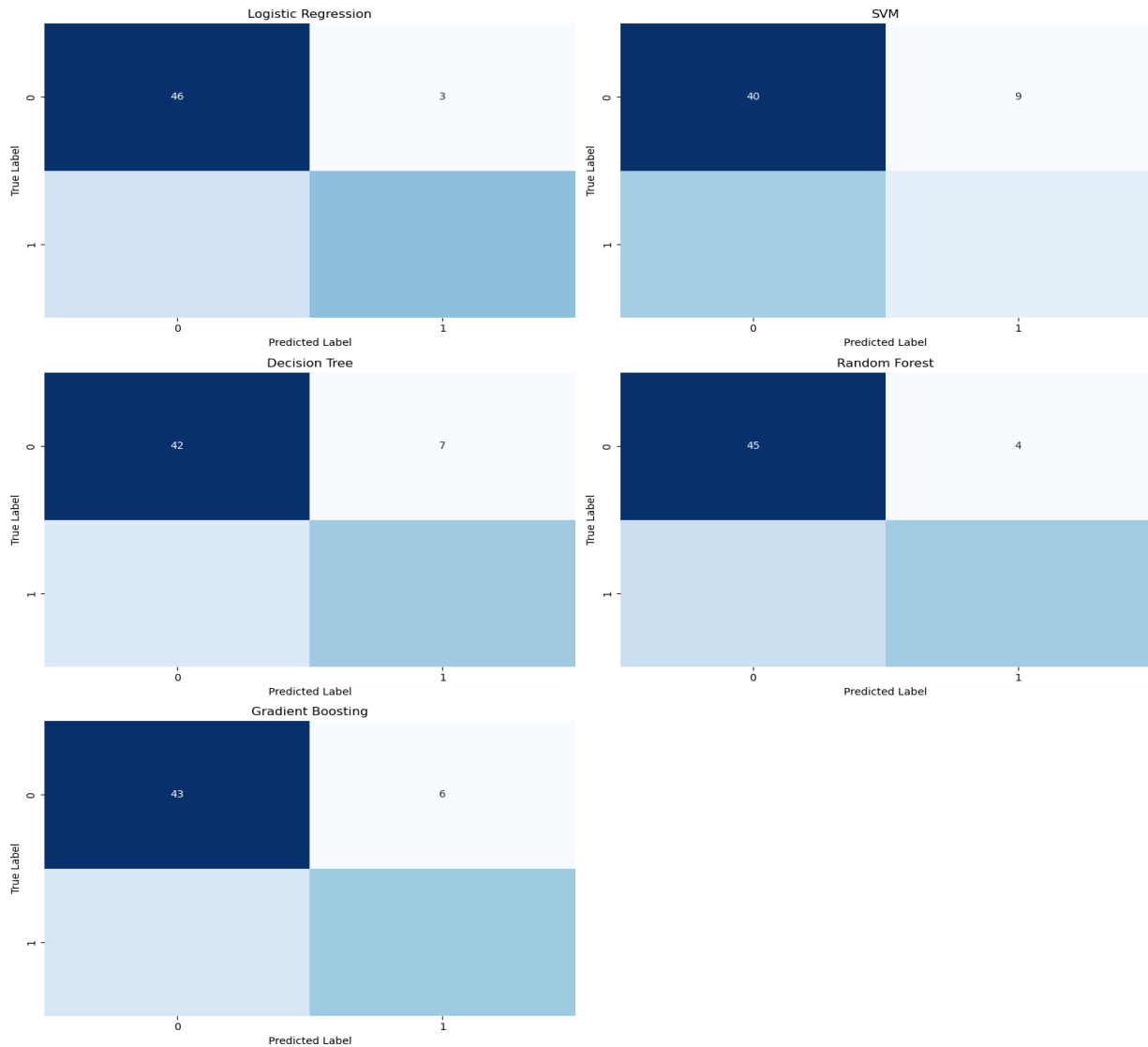


Figure 4. Confusion Matrices for Models

Source: by A.B. Temirbayeva

Conclusion

After careful evaluation of the results presented in the tables above, it becomes clear that the Logistic Regression model is the best choice for this dataset and for predicting CVDs. Its performance, as reflected in the estimates, leaves no room for doubt. The Logistic Regression model demonstrated high accuracy and ROC AUC values, indicating its ability to distinguish between patients with and without heart disease.

♦ *Precision*: shows the proportion of correctly predicted positive cases among all cases predicted

as positive. For class 1 (patients with heart disease), the Precision was 0.88, meaning that 89% of the “with heart disease” predictions were correct.

♦ *Recall (Completeness)*: shows the proportion of correctly predicted positive cases among all true positive cases. The completeness of class 1 was 0.75, indicating that the model correctly identified 75% of all cardiac patients.

♦ *F1-Score*: is the Harmonic mean of accuracy and completeness. For class 1, the F1-score was 0.79, indicating a balance between accuracy and completeness.

◆ *ROC AUC*: evaluates the classification quality based on the curve of “positive false classification rate” vs. “negative false classification rate”. A value of 0.79 means that the model has a good ability to discriminate between classes.

◆ AUC of 0.88, the highest among all the models, is a significant indicator of the superior performance of Logistic Regression in predicting heart disease in this dataset.

Therefore, it is clear that Logistic Regression is the optimal model for this dataset and the task of predicting heart diseases. Its high-performance evaluation metrics and balanced ratio between accuracy and completeness underscore its superiority.

References

1. Mendis S, Graham I, Narula J. Addressing the global burden of cardiovascular diseases; need for scalable and sustainable frameworks. *Global Heart*. 2022;17(1):46. <https://doi.org/10.5334/gh.1139> EDN: ALVXJY
2. Mukasheva G, Abenova M, Shaltynov A, Tsigen-gage O, Mussabekova Z, Bulegenov T, Shalgumbaeva G, Semenova Yu. Incidence and mortality of cardiovascular disease in the Republic of Kazakhstan: 2004–2017. *Iranian Journal of Public Health*. 2022;51(4):821–830. <https://doi.org/10.18502/ijph.v51i4.9243> EDN: DHJPUR
3. Abbas S, Ojo S, Hejaili AA, Sampetro GA, Almadhor A, Zaidi M, Kryvinska N. Artificial intelligence framework for heart disease classification from audio signals. *Scientific Reports*. 2024;14(1):3123. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53778-7> EDN: UPLLIK
4. Hossain MI, Maruf MH, Khan MAR, Prity FS, Fatema S, Ejaz MS, Khan M. Heart disease prediction using distinct artificial intelligence techniques: performance analysis and comparison. *Iran Journal of Computer Science*. 2023;6(4):397–417. <https://doi.org/10.1007/s42044-023-00148-7> EDN: IKJGNI
5. Zhang H, Zhang P, Wang Z, Chao L, Chen Y, Li Q. Multi-Feature decision fusion network for heart sound abnormality detection and classification. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2024;28(3):1386–1397. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2023.3307870> EDN: SSTBYM
6. Liu Z, Jiang H, Zhang F, Ouyang W, Li X, Pan X. Heart sound classification based on bispectrum features and Vision Transformer mode. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;85:49–59. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.035> EDN: EKYJWK
7. Mahajan RA, Balkhande B, Wanjale K, Chitre A, Jadhav TA, Hundekari SN. Enhancing Heart Disease Risk Prediction Accuracy through Ensemble Classification Techniques. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2023;11(10s):701–713. Available from: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3325> (accessed: 12.09.2024).
8. Rakhimov M, Akhmadjonov R, Javliev S. Artificial intelligence in Medicine for Chronic disease classification using Machine learning. *2022 IEEE 16th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2022:1–6 <https://doi.org/10.1109/aict55583.2022.10013587>
9. Hossain I, Maruf M, Khan MAR, Prity FS, Fatema S, Ejaz MS, Khan M. Heart disease prediction using distinct artificial intelligence techniques: performance analysis and comparison. *Iran Journal of Computer Science*. 2023;6(4):397–417. <https://doi.org/10.1007/s42044-023-00148-7> EDN: IKJGNI
10. Erdem K, Yildiz MB, Yasin ET, Koklu M. A detailed analysis of detecting heart diseases using artificial intelligence methods. *Intelligent Methods in Engineering Sciences*. 2023;2(4):115–124 <https://doi.org/10.58190/imiens.2023.71> EDN: DYZTFY
11. Salman HA, Kalakech A, Steiti A. Random Forest algorithm Overview. *Babylonian journal of machine learning*. 2024;2024:69–79. <https://doi.org/10.58496/bjml/2024/007> EDN: HWNARA
12. Wang Q. Support Vector machine algorithm in machine learning. *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. 2022:750–756. <https://doi.org/10.1109/icaica54878.2022.9844516>
13. Berrendero JR, Bueno-Larraz B, Cuevas A. On functional logistic regression: some conceptual issues. *Test*. 2022;32(1):321–349. <https://doi.org/10.1007/s11749-022-00836-9> EDN: XCAHRR
14. Bentéjac C, Csörgő A, Martínez-Muñoz G. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*. 2020;54(3):1937–1967. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>
15. Levy JJ, O'Malley AJ. Don't dismiss logistic regression: the case for sensible extraction of interactions in the era of machine learning. *BMC Medical Research Methodology*. 2020;20(1):171. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01046-3>
16. Liew BXW, Kovacs FM, Rugamer D, Royuela A. Machine learning versus logistic regression for prognostic modelling in individuals with non-specific neck pain. *European Spine Journal*. 2022;31(8):2082–2091. <https://doi.org/10.1007/s00586-022-07188-w> EDN: YWKGZQ
17. Becker T, Rousseau A, Geubbelmans M, Burzykowski T, Valkenborg D. Decision trees and random forests. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2023;164(6):894–897. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.09.011> EDN: QKTJHR

18. Mahajan RA, Balkhande B, Kirti Wanjale K, Chitre A, Jadhav TA, Hundekar SN. Enhancing Heart Disease Risk Prediction Accuracy through Ensemble Classification Techniques. *International Journal of*

Intelligent Systems and Applications in Engineering. 2023;11(10s):701–713. Available from: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3325/1911> (accessed: 12.09.2024).

About the authors

Aiym B. Temirbayeva, MS student in Applied Data Analytics, Astana IT University, 55/11 Mangilik El avenue, Business center EXPO, block C1, Astana, 010000, Kazakhstan; ORCID: 0009-0003-6131-2884; e-mail: aiymtemirbaeva@gmail.com

Arshyn Altybay, PhD of Philosophy, Senior Researcher of the Department of Differential Equations, Institute of Mathematics and Mathematical Modeling, 28 Shevchenko St, 050010, Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4939-8876; e-mail: arshyn.altybay@gmail.com

Сведения об авторах

Темирбаева Айым Болатовна, магистрант департамента по прикладной аналитике данных, Астанинский IT-университет, Казахстан, 010000, г. Астана, пр-т Мангилик Ел, 55/11, Бизнес-центр EXPO, блок C1; ORCID: 0009-0003-6131-2884; e-mail: aiymtemirbaeva@gmail.com

Алтыбай Аршын, доктор философии, старший научный сотрудник департамента дифференциальных уравнений, Институт математики и математического моделирования, Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 125; ORCID: 0000-0003-4939-8876; e-mail: arshyn.altybay@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-181-193

EDN: MBKAHR

Research article / Научная статья

Development of an Energy Complex of Wind Farms and Thermal Power Plants in China

Qiu Jin Zhu^{ORCID}, Oleg Yu. Sigitov^{ORCID}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ OlegSigitov@gmail.com

Article history

Received: January 26, 2025

Revised: March 22, 2025

Accepted: March 28, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. China is undergoing a transformation of its energy system to meet the goals of pollutant reduction and carbon neutrality. The integration of renewable energy sources into the existing energy system is a subject of considerable relevance. The initial phase of the study involved the development of a map showing potential sites for wind farms. Consequently, the locations exhibiting the highest and lowest levels of wind energy potential were identified. The second part of the study is based on an analysis of the current status of China's energy system and wind energy potential. It considers a model of an integrated energy complex combining wind farms and coal-fired thermal power plants. In order to develop such complex systems, it is necessary to consider the unstable operation modes of wind farms, in order to ensure that maximum energy consumption is covered. The findings of the study demonstrate that such a complex can play a significant role in optimizing the power structure, improving grid stability and reducing pollutant emissions, providing an effective solution for China's energy strategy.

Keywords: energy, electric power system, renewable energy sources, wind turbine, steam turbine, power balance, optimization

Authors' contribution

Zhu Q. — collection of materials, creation and processing of a database, development of a computer program; data analysis, writing a text; Sigitov O.Yu. — setting goals and objectives of research, scientific guidance.

For citation

Zhu Q, Sigitov OYu. Development of an energy complex of wind farms and thermal power plants in China. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):181–193. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-181-193>



Разработка энергетического комплекса из ветровых и тепловых электростанций в условиях Китая

Ц. Чжу^{ORCID}, О.Ю. Сигитов^{ORCID}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ OlegSigitov@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 26 января 2025 г.

Доработана: 22 марта 2025 г.

Принята к публикации: 28 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Китай находится в процессе трансформации энергетической системы, направленной на достижение целей снижения выбросов загрязняющих веществ и углеродной нейтральности. Актуальной является проблема интеграции возобновляемых источников энергии в существующую энергетическую систему. В связи с этим в первой части исследования разработана карта с потенциально подходящими местами для размещения ветровых электростанций. В результате были определены места с наибольшим и наименьшим потенциалом ветровой энергии. На основе анализа текущего состояния энергетической системы Китая и потенциала ветровой энергии во второй части исследования рассмотрена модель интегрированного энергетического комплекса, сочетающего ветровые электростанции и угольные тепловые электростанции. Для разработки такого комплекса необходимо, чтобы максимальное энергопотребление покрывалось с учетом нестабильных режимов работы ветровых электростанций. Результаты исследования показывают, что такой комплекс может играть значительную роль в оптимизации структуры энергетики, повышении стабильности сети и снижении выбросов загрязняющих веществ, предоставляя эффективное решение для реализации энергетической стратегии Китая.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, паровая турбина, энергетический баланс, оптимизация

Вклад авторов

Чжу Ц. — сбор материалов, создание и обработка базы данных, разработка компьютерной программы; анализ данных, написание текста; Сигитов О.Ю. — постановка целей и задач исследования, научное руководство.

Для цитирования

Zhu Q., Sigitov O.Yu. Development of an energy complex of wind farms and thermal power plants in China // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 181–193. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-181-193>

Introduction

As the world's second-largest economy, China's energy consumption continues to increase, exacerbating the conflict between energy security and environmental sustainability. In 2023, China's total energy consumption exceeded 5.5 billion tons of standard coal, with fossil fuels, particularly coal, dominating the energy mix. However, the extensive use of coal has led to severe air pollution and green-house gas emissions.

To address climate change and achieve sustainable development goals, China has proposed

the “carbon peaking and carbon neutrality” strategy, aiming to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. This goal has accelerated the development of renewable energy in China with wind power owing to its environmental benefits and renewability and has become a key focus in China's energy transition.

The intermittency and instability of wind power make it difficult to solely undertake the base load power supply. Wind energy power generation fluctuates significantly owing to natural conditions, whereas the grid requires a high level of real-time

supply and demand balance. This contradiction is particularly evident in regions with a high proportion of wind power.

Thermal power, especially coal-fired power, with its stable operation and strong peak-shaving capability, is an important means of compensating for fluctuations in wind power. By implementing flexibility retrofits to coal-fired units, power output can be more efficiently regulated, thus achieving complementary integration of wind and thermal power and providing reliability support to the grid.

Therefore, this study aims to explore how to effectively integrate wind farms and coal thermal power plants under Chinese conditions to:

- 1) improve the stability and flexibility of the energy systems;
- 2) optimize the energy structure and reduce carbon emissions;
- 3) provide a scientific basis and technical support for China's energy strategy.

1. Overview of China energy system structure

China's energy system is predominantly coal-based, but it also includes various forms of energy, such as wind, hydro, solar, and nuclear power. In recent years, the installed capacities of wind and solar power have increased significantly. As of 2023, China's total installed capacity for wind and photovoltaic power has reached 400 GW and 360 GW, respectively, accounting for approximately 40% of the global total and sustainability (Figure 1).

Below is brief information about various types of large power plants in the Chinese energy system.

Coal Thermal power plant. Tuoketuo Power Station is the largest coal-fired power plant in China and the world. The plant has a nameplate capacity of 6,720 MW. It consists of eight 600 MW units, two 300 MW units, and two 660 MW ultra-supercritical units. The power plant sources its coal from the Junggar Coalfield, which is approximately 50 km away. It meets its water requirements by pumping from the Yellow River, which is located 12 km away. Tuoketuo Power Station is one of the ten most carbon-emitting coal-fired

power plants in the world. In 2018, it emitted approximately 29.46 million tons of carbon dioxide, with relative emissions estimated at 1.45 kg per kWh. The electricity generated at the plant is delivered to Beijing via 500-kV transmission lines. The plant includes ultra-supercritical units, which are more efficient and produce lower emissions than traditional coal-fired units. Tuoketuo Power Station plays a significant role in China's energy landscape, providing substantial power output while also facing challenges related to environmental impact and sustainability [1].

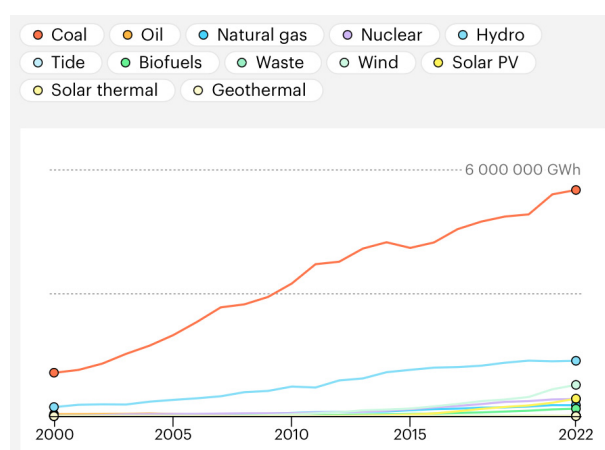


Figure 1. Evolution of electricity generation sources in China since 2000

Source: by EIA. Available from: <https://www.iea.org/countries/china> (accessed: 18.07.2024)

Oil power plants. China has several oil-fired power plants, although they are not as prominent as coal or hydroelectric plants. For example, Penny's Bay Power Station, Lantau Island, Hong Kong 300 MW, is primarily used as a peaking power plant, meaning that it operates during periods of high electricity demand. Shunde Power Station Shunde, Guangdong Province 278 MW, also serves as a peaking power plant, providing additional power during peak demand times. Wuhan Zhuankou Power Station Wuhan, Hubei Province 180 MW, is used for backup power and during periods of high demand. Coloane A Power Station Macau 271 MW, Companhia de Electricidade de Macau, This plant provides power to the Macau region and is used as a backup and peaking power plant.

These oil-fired power plants play a crucial role in providing backup power and meeting peak electricity demand, although their use is declining due to environmental concerns and the shift towards cleaner energy sources [2].

Natural gas power plants. China has several natural gas power plants, such as Guangdong Huizhou Natural Gas Power Plant, Huizhou, Guangdong Province (2.400 MW). It is one of the largest natural gas power plants in China and provides significant power to the Guangdong region. It uses advanced combined-cycle gas turbine technology to achieve high efficiency and lower emissions. Shanghai Caojing Natural Gas Power Plant (2.000 MW). This plant is a key part of Shanghai's energy infrastructure, utilizing natural gas to produce electricity with a reduced environmental impact compared to coal-fired plants. Beijing Jingneng Gas Power Plant (1.800 MW). This plant plays a crucial role in providing electricity to Beijing, particularly during peak demand periods. It is known for its high efficiency and low emissions. Tianjin Binhai Natural Gas Power Plant (1.500 MW). This plant supports the energy needs of the Tianjin region, contributing to the reduction of air pollution by using cleaner natural gas instead of coal. Zhejiang Ningbo Natural Gas Power Plant (1.200 MW) is part of Zhejiang's efforts to diversify its energy mix and reduce reliance on coal. It uses state-of-the-art technology to maximize efficiency and minimize emissions.

These natural gas power plants are part of China's broader strategy to reduce air pollution and greenhouse gas emissions by increasing the use of cleaner energy sources [3].

Nuclear power plants. China has several nuclear power plants. For example: Yangjiang Nuclear Power Plant Guangdong Province (6.000 MW). The Yangjiang Nuclear Power Plant is the largest in China, featuring six 1 GW CPR-1000 pressurized water reactors (PWRs). The plant is operated by the Yangjiang Nuclear Power Company, a subsidiary of the China General Nuclear Power Group (CGN). The first unit was commissioned in 2014, and the sixth unit became operational in 2019. Hongyanhe Nuclear Power

Plant Liaoning Province (4.500 MW) consists of four 1 GW PWRs and two additional reactors under construction. It is operated by the Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Company, a joint venture between CGN and China Power Investment Corporation. Qinshan Nuclear Power Plant Zhejiang Province (4.500 MW) is one of the oldest and largest nuclear power plants in China, with multiple reactors, including PWRs and heavy water reactors. It is operated by the China National Nuclear Corporation (CNNC). Tianwan Nuclear Power Plant Jiangsu Province (3.000 MW) features four 1 GW PWRs, with two additional reactors under construction. It is operated by the Jiangsu Nuclear Power Corporation, a subsidiary of the CNNC. Fuqing Nuclear Power Plant Fujian Province (6.000 MW) operates six PWRs, including two Hualong One reactors, which are China's indigenous third-generation nuclear reactors. It is operated by the Fujian Fuqing Nuclear Power Company, a subsidiary of CNNC [4].

The primary challenge for nuclear power plants is to manage radioactive waste and ensure safety. Although nuclear power is a low-carbon energy source, potential accidents and long-term storage of radioactive waste pose significant risks. Additionally, the high costs and long construction times of nuclear plants can be barriers to their development.

Hydro power plants. China has several hydro power plants, for example, Three Gorges Dam Hubei Province (22.500 MW). The Three Gorges Dam is the largest hydroelectric power station in the world, owing to its installed capacity. It spans the Yangtze River and was completed in 2008. The dam generates approximately 98.8 TWh of electricity annually.

The construction of the Three Gorges Dam has led to significant environmental and social issues, including the displacement of over 1.3 million people and the submergence of numerous archaeological and cultural sites. Additionally, the dam has altered the ecosystem of the Yangtze River, affecting fish populations and sediment flow.

Baihetan Dam Yunnan and Sichuan Provinces (16.000 MW). The Baihetan Dam is the second-

largest hydroelectric power station in China. It spans the Jinsha River and was completed in 2021. The dam generates approximately 60.24 TWh of electricity annually.

Similar to the Three Gorges Dam, the Baihetan Dam has caused environmental concerns, including habitat disruption and changes in river flow patterns. Construction also required the relocation of local communities.

Xiluodu Dam Sichuan Province (13.860 MW), The Xiluodu Dam is the third-largest hydroelectric power station in China. It spans the Jinsha River and was completed in 2014. The dam generates approximately 55.2 TWh of electricity annually.

The construction of the Xiluodu Dam has led to environmental impacts, such as changes in river flow and sediment transport. Additionally, the project required the relocation of thousands of residents [5].

Wudongde Dam Yunnan and Sichuan Provinces (10.200 MW), The Wudongde Dam is the fourth-largest hydroelectric power station in China. It spans the Jinsha River and was completed in 2020.

The Wudongde Dam has caused environmental concerns, including habitat disruption and changes in river flow patterns. Construction also required the relocation of local communities.

Xiangjiaba Dam Sichuan Province (6.400 MW). The Xiangjiaba Dam is the fifth-largest hydroelectric power station in China. It spans the Jinsha River and was completed in 2012.

The construction of the Xiangjiaba Dam has led to environmental impacts such as changes in river flow and sediment transport. Additionally, the project required the relocation of thousands of residents.

These hydro power plants play a crucial role in China's energy landscape, providing substantial power output while also facing challenges related to environmental impact and sustainability.

Other power plant types. Power plants can be classified into various types based on their energy source. Some common types of power plants are as follows:

Solar Power Plants: These plants convert sunlight into electricity using photovoltaic (PV) panels

or solar-thermal systems. Solar power plants are known for their low environmental impact and renewability. They are often used in regions with high solar insolation [6].

Wind Power Plants: Wind turbines convert the kinetic energy of wind into electricity. Wind power plants are clean and renewable energy sources with minimal environmental impact. They are commonly found in areas with consistent and strong wind.

Geothermal Power Plants: These plants use heat from Earth's interior to generate electricity. Geothermal power plants are highly efficient and have low environmental footprints. These are typically located in regions with significant geothermal activity.

Biomass Power Plants: Biomass power plants burn organic materials, such as wood, agricultural residues, and waste, to produce electricity. They are considered renewable and can help reduce waste; however, they emit carbon dioxide and other pollutants.

Tidal Power Plants: These plants harness energy from tidal movements to generate electricity. Although tidal power is predictable and renewable, the construction of tidal power plants can have a significant environmental impact on marine ecosystems [7].

Renewable energy sources. China is the world leader in electricity production from renewable energy sources, with significant contributions from hydro, solar, and wind power. The country aims to have 80% of its total energy mix from non-fossil fuel sources by 2060 and achieve a combined 1.200 GW solar and wind capacity by 2030. In 2023, China was on track to reach 1.371 GW of wind and solar power by 2025, five years before the target.

Overview of status and location of wind farms in China. The expansion of wind power in China is mainly concentrated in resource-rich areas, such as Inner Mongolia, Xinjiang, and the eastern coastal regions. Technological advancements have significantly reduced the cost of wind power, and the application of large wind turbines has further improved the power generation efficiency and stability. However, a high proportion of wind power

integration into the grid poses a higher demand for grid dispatch and energy storage technologies.

For wind farm placement investigation, it is necessary to pay attention to different factors, such as energy demand, electricity grid in operation, possibilities of wind turbine component delivery, and wind power protection. Therefore, places near major cities with a radius of 400 km were chosen.

To calculate the wind power potential, attention was paid to changing various parameters such as: wind speed, air density, atmospheric pressure and temperature. This is because of the height of the modern wind turbine hub. (Blade length: Modern wind turbine blades can exceed 100 m. One of the longest blades currently in production is 108 m, which is used in the Haliade-X offshore wind turbine and can generate up to 14 megawatts (MW). Hub Heights: Onshore turbines now commonly feature hub heights of 100–160 meters, while offshore turbines can reach even greater heights. This design allows turbines to access stronger, steadier winds at higher altitudes, significantly improving energy yield [8].

As a result, it is necessary to recalculate the parameters (wind speed, air density, and atmospheric pressure) to the wind turbine height. There are various methods for calculating wind energy parameters depending on the external conditions¹ [9; 10].

The wind speed calculation at different heights was based on the following formula:

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m,$$

where h_2 is wind speed at WT altitude, m/s; h_1 is wind speed at measurement altitude, m/s; h_2 is tower height, m; h_1 is wind speed measurement height (weather vane height), m; m is Hellman coefficient.

The air density changes also depend on height and are based on the following formula:

$$\rho = 3.4837 \frac{P(h)}{T},$$

where ρ is air density, kg/m³; $p(h)$ is air pressure at height h ; kPa; T is air temperature, K; 3.4837 is specific gas constant of dry air.

For the calculations, the value of (h) up to a height of 5000 m can be determined using the following equation:

$$P(h) = 101.29 - 0.011837h + 4.793 \times 10^{-7} h^2,$$

where h is height from the ground surface, m.

Thus, nine cities from China were selected, representing a diverse geography from the center, south, and north, with close distances of approximately 400 km: Inner Mongolia — Hohhot, Ningxia — Yinchuan, Tibet — Lhasa, Xinjiang — Urumqi, Yunnan — Kunming, Gansu-Dunhuang, Gansu — Lanzhou, Qinghai — Xining, and Xinjiang — Hami. The weather website was used to download the required data for 2023. For the calculations we use a wind turbine GE 3.4-137 with an installed capacity of 3.4 MW. The results for the average wind speed, air temperature, and wind flow power are presented in Figures 2–4.

Table 1 presents the average values of the wind energy parameters for Sanya in 2023. The map of the calculation results is presented in Figure 5. Wind power protentional $P(W)$ is the quantitative indicator that calculated as the sum of the average monthly wind flow power as follows:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho_{ave} A V_{ave}^3,$$

where n is the number of month during the year, ρ_{ave} is the average air density during the month kg/m³, A is the cross section of wind turbine m², V is average wind speed during the month, m/s.

In the result we can see places with highest energy protentional (Inner Mongolia — Hohhot 831MW, Ningxia-Yinchuan 74MW, Tibet — Lhasa 195MW Xinjiang-Urumqi 183MW, Yunnan — Kunming 259MW, Gansu-Dunhuang 1497MW, Gansu — Lanzhou 479MW, Qinghai — Xining 478MW, Xinjiang — Hami 212MW).

¹ Sigítov OY, Radin YA. *Wind energy: a textbook*. 2024. ISBN 978-5-209-12118-3.

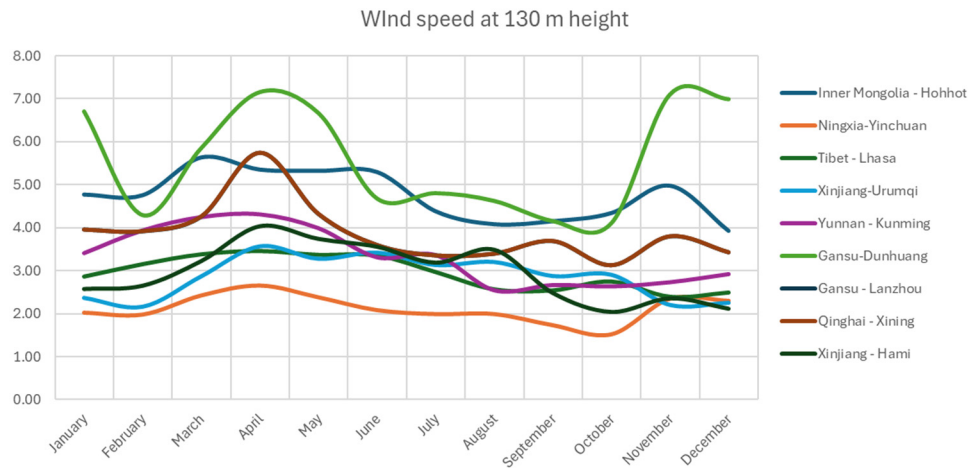


Figure 2. Average wind speed for nine cities of China
Source: by Zhu Qiujin

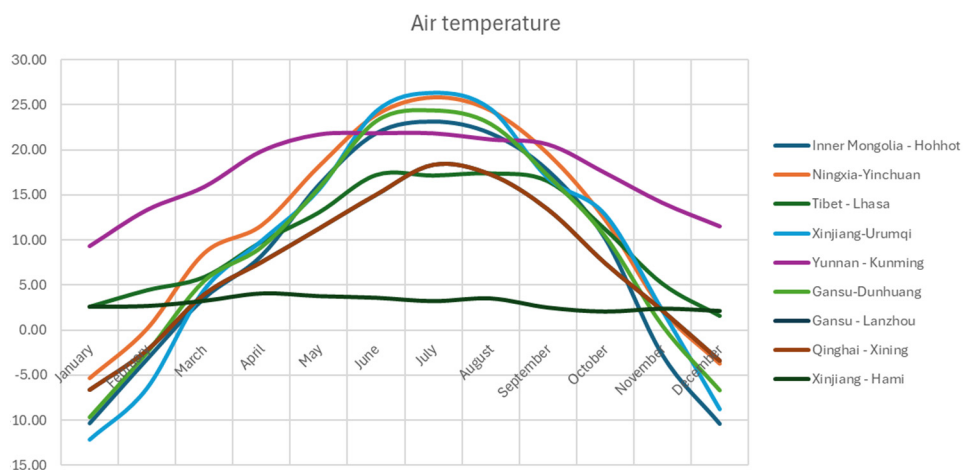


Figure 3. Average air temperature for nine cities of China
Source: by Zhu Qiujin

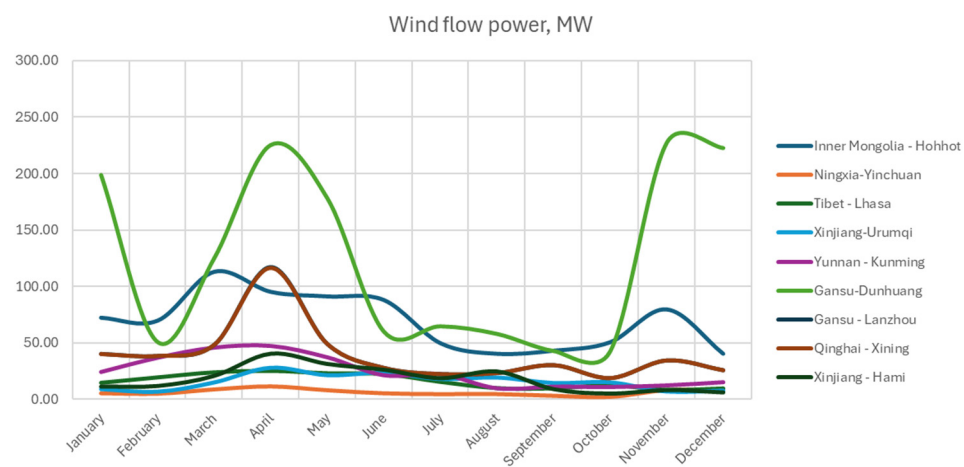
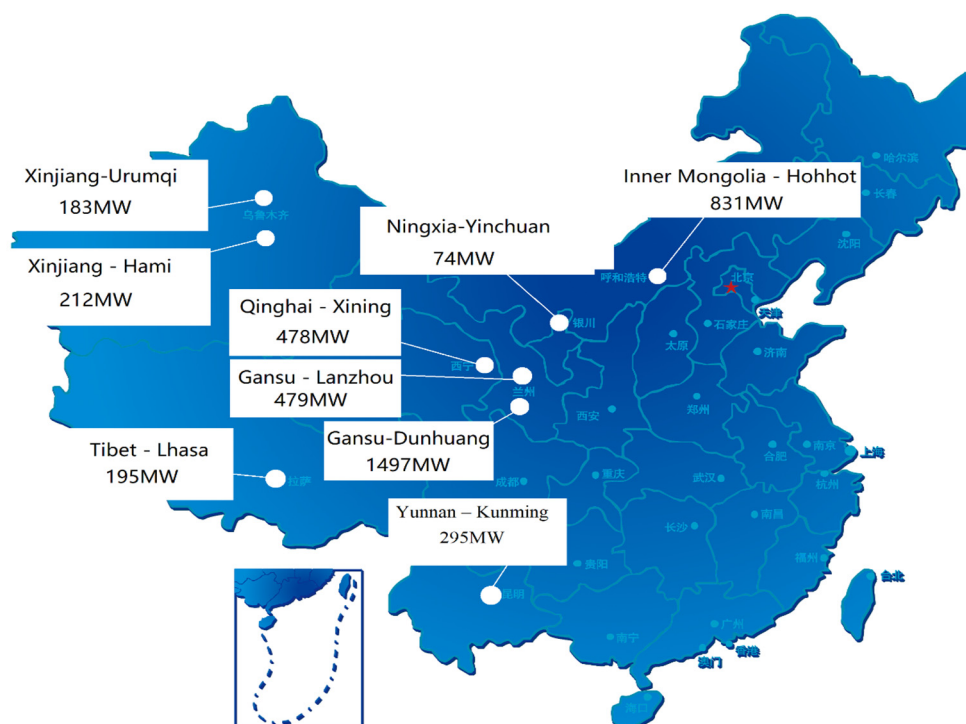


Figure 4. Average wind flow power for nine cities of China
Source: by Zhu Qiujin

**Figure 5.** Map of wind power protentional in China

Source: by Zhu Qiujin for Colter. Available from: <http://www.coliter.com/list/?language=1&classid=4> (accessed: 15.09.2024)

Table 1

Average values of wind energy parameters for Gansu-Dunhuang during the year

Parameters	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
V10, m/s	4.68	3.00	4.09	5.00	4.65	3.27	3.36	3.23	2.90	2.87	4.96	4.88
t , °C	-9.67	-2.50	5.46	9.22	15.74	23.18	24.38	22.88	17.14	10.41	0.48	-6.68
V130, m/s	6.70	4.30	5.85	7.15	6.67	4.68	4.81	4.63	4.16	4.11	7.10	6.99
ρ 130, kg/m ³	1.32	1.28	1.25	1.23	1.20	1.17	1.17	1.17	1.20	1.23	1.27	1.30
$P(W)$	198.89	50.94	125.15	225.37	178.20	60.15	64.89	58.14	43.05	42.55	227.27	222.70

Source: by Zhu Qiujin

2. Results

2.1. Flexibility of Energy Systems

China's energy system is enhancing the flexibility of traditional power generation sources, namely, nuclear, hydro, and thermal (coal-fired) power, to accommodate the increasing share of renewable energy and ensure grid stability. A de-

tailed examination of the flexibility of these conventional power generation sources is as follows in Table 2.

Nuclear power plants are designed for continuous, stable base-load operations, and have limited flexibility. Their long start-up times and low ramp rates render them unsuitable for rapid load adjustments.

Table 2

Comparison of the flexibility of conventional power generation sources

Parameter	Nuclear Power	Hydro Power	Thermal Power (Coal-Fired)
Minimum Load (% of rated capacity)	50–60%	0–30%	20–60%
Ramp Rate (% per minute)	1–3%	10–30%	2–6%
Start-Up Time	–	< 1 min	1–10 hour

Source: by Zhu Qiujiu

Table 3

Comparison of operational parameters before and after flexibility retrofitting

Parameter	Before Retrofitting	After Retrofitting
Minimum Load (% of rated capacity)	50–60%	20–30%
Ramp Rate (% per minute)	1–3%	3–5%
Start-Up Time (hours)	4–10	< 2

Source: by Zhu Qiujiu

Hydropower plants, particularly those with reservoir storage, offer high operational flexibility. They can start up quickly and adjust their output rapidly, making them ideal for load following and balancing intermittent renewable sources².

Traditionally, coal-fired power plants have exhibited moderate flexibility. However, through flexibility retrofitting, their operational parameters can be enhanced to better support grid demands.

To support the integration of renewable energy, China is implementing strategies to enhance the flexibility of its traditional power generation sources.

1. *Flexibility Retrofitting of Coal-Fired Plants.* Modifications are being made to reduce minimum load levels, increase ramp rates, and shorten start-up times, enabling coal-fired plants to respond more effectively to fluctuations in renewable energy generation [11].

2. *Optimizing Hydropower Utilization.* Efforts are underway to maximize the flexible operation of hydropower plants by leveraging their rapid response capabilities to balance supply and demand [12].

3. *Developing Ancillary Services.* The establishment of ancillary service markets encourages traditional power plants to provide flexible services,

such as frequency regulation and reserve power, to support grid stability [13].

By enhancing the flexibility of traditional power generation sources, China aims to create a more resilient and adaptable energy system that can integrate higher proportions of renewable energy.

China is actively enhancing the flexibility of its coal-fired power plants to better integrate renewable energy sources and to ensure grid stability. This process, known as “flexibility retrofitting,” enables coal power units to operate more dynamically, accommodating the variable nature of wind and solar power. There are several key Aspects of Flexibility Retrofitting (Table 3).

1. *Minimum Load Reduction.* Lowering the minimum operational load of coal-fired units allows them to decrease their output during periods of low demand, thereby facilitating greater integration of renewable energy. For instance, subcritical units can reduce their minimum load to 30% of the rated capacity, while supercritical units can achieve reductions to 20–25%.

2. *Ramp Rate Enhancement.* Improving ramp rates enables coal-fired units to adjust their output more rapidly in response to fluctuations in renewable energy generation. Typical ramp rates can be

² Innovation landscape brief: Flexibility in conventional power plants. *International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi, 2019. Available from: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Flexibility_in_CPPs_2019 (accessed: 10.12.2024).

increased from 1–3% per minute to 3–5% per minute through retrofitting.

3. Start-Up Time Reduction. Decreasing the time required for coal-fired units to start up from a cold state enhances their ability to provide backup power when the renewable sources are insufficient. Retrofitting can reduce start-up times from several hours to less than two hours.

It is necessary to note the negative factors of variable modes. Frequent load changes and low-load operations can increase the wear and tear on equipment, potentially reducing the lifespan of coal-fired units. Operating at lower loads may lead to decreased efficiency and higher specific fuel consumption, thereby impacting the economic viability of plants. In addition, low-load operations can affect the performance of emission control systems, potentially leading to increased pollutant emissions if not properly managed.

Despite these challenges, the flexibility retrofitting of coal-fired power plants is a crucial step for China to enhance grid flexibility and support the large-scale integration of renewable energy sources. Ongoing research and development aim to optimize these retrofitting processes and balance the operational flexibility with economic and environmental considerations.

2.2. Development of Energy Complex Consist of Wind Farms and Thermal Power Plant In China Condition

China is actively developing energy complexes that integrate wind farms with coal power plants to enhance energy security, improve grid stability, and support the integration of renewable energy sources. These hybrid systems leverage the advantages of both wind and coal power to create a more resilient and flexible energy infrastructure.

The key Features of Hybrid Energy Complexes are that wind farms provide renewable energy, while coal power plants offer reliable base-load power. This combination ensures a stable power supply, even when wind conditions are not favorable. Coal power plants can quickly ramp up or down to balance the variability of wind power and maintain the grid stability. Integrating wind

power reduces the overall carbon footprint of the energy complex and contributes to China's climate goals [14].

One such example is the Gansu Wind Farm and Coal Power integration project. Gansu Wind Farm, one of the largest in the world, is integrated with nearby coal power plants to provide a stable and reliable power supply.

The Gansu Wind Farm, one of the largest wind farms in the world, has a nameplate capacity of 10.45 GW, with plans to expand to 20 GW [15]. This massive wind power installation was integrated with nearby coal power plants to provide a stable and reliable power supply.

In Shanxi Province, the hybrid energy complex combines wind farms with ultra-supercritical coal power plants. The installed capacity of new energy produced by wind and solar power in Shanxi Province reached 50.93 million kilowatts as of January 2024 [16].

These hybrid energy complexes demonstrate the feasibility and benefits of integrating renewable energy sources with traditional power generation to enhance energy security, improve grid stability, and support China's climate goals.

This project demonstrates the feasibility and benefits of hybrid energy complexes. In Shanxi Province, a hybrid energy complex combines wind farms with ultra-supercritical coal power plants. This integration enhances the efficiency and flexibility of the power system.

Table 4 lists the operational parameters of Hybrid Energy Complexes. These sources provide comprehensive insights into the development of and challenges faced by Hybrid Energy Complexes in China. The development of hybrid energy complexes requires significant investments in infrastructure and technology. Managing the integration of wind and coal power requires advanced control systems and coordination. Although emissions are reduced, coal power plants still contribute to pollution and carbon emissions [17].

To calculate the energy complex, it is necessary to develop such an energy complex, including wind farms and thermal power plants, in which the maximum power consumption will be covered,

taking into account the operating modes of the wind farm. The objective function in this case is presented as:

$$z = \sum_{i=1}^n C_i N_i \rightarrow \min ,$$

where C_i is the lifetime cost of the i -th generating unit (million USD), N_i is amount of generation unit, n — amount of generation unit type (wind turbine (WT), gas turbine (GT), combined-cycle gas turbine (CCGT), steam turbine (ST)).

Table 4

Operational parameters of hybrid energy complexes

Parameter	Wind Farms	Coal Power Plants	Hybrid Energy Complexes
Capacity Factor	30–50%	60–80%	50–70%
Flexibility	Low	High	Decrease ¹
Emissions	Zero	High	Decrease

¹⁾ Flexibility is decreased in corresponding to requirements of energy system

Source: by Zhu Qiujin

Table 5

Input data of energy complex

Power plant type	Energy unit type	Maximum amount of energy unit	Nominal capacity, MW	Low limit of power range, MW	Available power range, MW	Power ramp, MW/min	Lifetime cost, million USD
Wind Farm (WF)	L-100	999	2.5	0	0	0	4
Coal Power Plant	ST 300 MW K-300-240	999	300	150	150	12	5 500
Coal Power Plant	SSG	999	600	180	420	30	6 000

Source: made by Zhu Qiujin

For this energy complex, we have the following constraints.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{dP_i(t)}{dt} N_i \geq \frac{dP_{wt}(t)}{dt} N_i \\ \sum_{i=1}^n P_i^{\text{range}} N_i \geq \Delta P_{wt} N_i \\ P_i^{\text{nom}} N_i + P_{wt}^b N_i \geq P_{\text{load}} \\ N_i < N_{\text{max}}. \end{cases}$$

The constrains of wind farms:

$$\begin{cases} \frac{dP_{wt}(t)}{dt} N_i = \frac{0.1 P_{wt}^{\text{nom}}}{dt} N_i \\ \Delta P_{wt} = 0.9 P_{wt}^{\text{nom}} N_i \\ P_{wt}^b = 0.2 P_{wt}^{\text{nom}} N_i, \end{cases}$$

where $\frac{dP_i(t)}{dt}$ is the power ramp of the i -th generation unit GT, CCGT, ST, and MW/min; $\frac{dP_{wt}(t)}{dt}$ is the maximum power ramp of the WT (MW/min); P_i^{range} is the available power range of GT, CCGT, ST, and MW; ΔP_{wt} is the maximum amplitude of the WT power change, MW; P_i^{nom} is the nominal capacity of the GT, CCGT, ST, MW; P_{wt}^b is the basis power of the WT, MW; P_{wt}^{nom} is the nominal capacity of the WT, MW.

Considering the above information regarding energy sources and their flexibility characteristics, Table 5 shows the input data for the objective function calculation.

Let us consider a case in which it is planned to create an energy complex of wind farms and thermal coalfired power plants. The following generating equipment is presented for considerat-

ion: one wind turbine (*L-100*) with a capacity of 2.5 MW and two coal-fired power units (*K-300-240* and *SSG*) with capacities of 300 and 600 MW, respectively. In accordance with the objective function, constraint equations, and initial information on the maximum number of energy units, nominal capacity, low limit of power range available, power ramp, and lifetime cost, an optimal energy complex was obtained for a load with a capacity of 1500 MW. The energy complex includes the following components:

- a wind farm with an installed capacity of 600 MW, including 240 wind turbines;

- a thermal power plant, which includes two coal-fired power units (*SSG*) with a total installed capacity of 1,200 MW.

The total lifetime costs for such complex will amount to 12.960 million USD.

Accordingly, such energy complexes can be applied for the further development of China's energy system. They simultaneously provide technical feasibility, in terms of flexibility and economic efficiency.

Conclusion

The main classes and limitations that must be considered when constructing and optimizing schedules of classes are identified based on the application of a systems approach to the automated compilation of a schedule of classes for a multi-level university.

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 because of the specifics of the 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. Grant D, Zelinka D, Mitova S. Reducing CO₂ emissions by targeting the world's hyper-polluting power plants. *Environmental Research Letters*. 2021;16:094022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac13f1> EDN: DDXGGQ
2. Zhao Y, Zhang T, Sun L, Tong L, Wang L, Ding J, Ding Yu. Energy storage for black start services: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29:691–704. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2445-0> EDN: INOHVK
3. Ye L-C, Lin HX, Tukker A. Future scenarios of variable renewable energies and flexibility requirements for thermal power plants in China. *Energy*. 2019;167:708–714. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.174>
4. Jie Y, Zhijie G, Yangjun Z, Bing L, Yan W. Analysis on the emission of tritium from Qinshan nuclear power base of China in recent ten years. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;227:052031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/227/5/052031>
5. Zhang X, Dong Z, Gupta H, Wu G, Li D. Impact of the Three Gorges Dam on the hydrology and ecology of the Yangtze river. *Water*. 2016;8(12):590–605. <https://doi.org/10.3390/w8120590>
6. Winter CJ, Sizmann RL, Vant-Hull LL. *Solar power plants: fundamentals, technology, systems, economics*. Berlin: Springer Publ.; 1991. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61245-9> ISBN: 978-3-642-61245-9
7. Kangaji L, Orumwense E, Abo-Al-Ez K. Modelling and simulation of tidal energy generation system: A systematic literature review. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2022; 9(92):1028–1055. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.875704>
8. Tumse S, Bilgili M, Yildirim A, Sahin B. Comparative analysis of global onshore and offshore wind energy characteristics and potentials. *Sustainability*. 2024; 16(15):6614–6628. <https://doi.org/10.3390/su16156614> EDN: SVFGCP
9. Cisneros-Saldana JI, Hosseinian S, Butenko S. Network-based optimization techniques for wind farm location decisions. *Frontiers of Engineering Management (FEM)*. 2018;5(4):533–540. <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2018025>
10. Rao KR. *Wind energy for power generation: Meeting the challenge of practical implementation*. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75134-4>
11. Liu J, Guo T, Wang Y, Li Y, Xu S. Multi-technical flexibility retrofit planning of thermal power units con-

sidering high penetration variable renewable energy: The case of China. *Sustainability*. 2020;12(9):3543–3558. <https://doi.org/10.3390/su12093543> EDN: OTUXSN

12. Lewandowski M, Góralczyk A, Janicki W. Optimization algorithms for sustainable operation of multi-unit hydropower plants. *Sustainability*. 2024;16(24): 11093–11110. <https://doi.org/10.3390/su162411093> EDN: REUZSD

13. Yi Z, Meng S, Abdolhosseinzadeh S. Optimal hydroelectric energy utilization with ATDOA: a case study of the Bumbuna Dam. *Water Supply*. 2024;24(10):3295–3313. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.069> EDN: YWOTLE

14. Zhou XC, Liu FC, Zheng JJ. Analyses on integration of wind power into Gansu Power Grid. *Advanced Materials Research*. 2012;608-609:569–572. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.569>

15. Xiangjiaba D, Dai L, Dai H, Liu H, Wang Y, Guo J, Cai Z, Mi C. Development of an optimal model for the Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoir system considering the downstream environmental flow. *Sustainability*. 2020;12(3):966–980. <https://doi.org/10.3390/su12030966> EDN: GVQRVJ

16. Ye B, Xie M, Yu Z, Lu Z, Yan D, Su B, Wang P, Jiang J. Technical and economic study of renewable-energy-powered system for a newly constructed city in China. *Energy Reports*. 2024;11:5069–5082. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.059> EDN: LPVEHX

17. Grant D, Zelinka D, Mitova S. Reducing CO₂ emissions by targeting the world's hyper-polluting power plants. *Environmental Research Letters*. 2021;16(9):1–15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac13f1> EDN: DDXGGQ

About the authors

Qiujin Zhu, Senior Lecturer of the Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-8824-9306; e-mail: zhuqiujin1@gmail.com

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

Сведения об авторах

Чжу Цицзинь, старший преподаватель кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0005-8824-9306; e-mail: zhuqiujin1@gmail.com

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



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-2-194-204

EDN: MCRCRD

Research article / Научная статья

The Energy Complex of Wind and Thermal Power Plants: Development in Iraq

Aldraisawi Osamah^{ID}, Oleg Yu. Sigitov^{ID}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ OlegSigitov@gmail.com

Article history

Received: January 26, 2025

Revised: March 22, 2025

Accepted: March 28, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The power system of Iraq aims to integrate all energy sources such as thermal power plants and renewable energy sources including wind energy. Wind speed data for 2022 in five locations were obtained to calculate the wind energy potential of Iraq in the first part of the study. The selected locations were used to plot the graph of the regional distribution of average wind speed in Iraq. Four regions were identified according to the level of wind energy potential. Statistical analysis including wind flow power calculation was performed for each location. The second part of the study considered an energy complex including wind power plants and natural gas-fired thermal power plants. To develop such a complex, it is necessary that the maximum energy consumption is covered taking into account the unstable operating modes of wind power plants. The results show the technical feasibility in terms of flexibility and cost-effectiveness of such an energy complex.

Keywords: energy, electric power system, renewable energy sources, wind turbine, gas turbine, combined-cycle gas turbine, power balance, optimization

Authors' contribution

Osamah A. — collection of materials, creation and processing of a database, development of a computer program; data analysis, writing a text; Sigitov O.Yu. — setting goals and objectives of research, scientific guidance.

For citation

Osamah A., Sigitov OYu. The energy complex of wind and thermal power plants: Development in Iraq. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(2):194–204. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-194-204>



Энергетический комплекс ветровых и тепловых электростанций: разработка в условиях Ирака

А. Осама^{ORCID}, О.Ю. Сигитов^{ORCID}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ OlegSigitov@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 26 января 2025 г.
Доработана: 22 марта 2025 г.
Принята к публикации: 28 марта 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Электроэнергетическая система Ирака стремится обеспечить интеграцию всех источников энергии, таких как тепловые электростанции и возобновляемые источники энергии, включая энергию ветра. В первой части исследования для расчета ветроэнергетического потенциала Ирака применены данные о скорости ветра за 2022 г. в пяти населенных пунктах. Выбранные местоположения были использованы для построения графика регионального распределения средней скорости ветра в Ираке. Выделено четыре района по уровню ветроэнергетического потенциала. Для каждого населенного пункта проведен статистический анализ, включающий расчет мощности ветрового потока. Во второй части рассмотрен энергетический комплекс, включающий ветровые электростанции и тепловые электростанции на природном газе. Для разработки такого комплекса необходимо, чтобы максимальное энергопотребление покрывалось с учетом нестабильных режимов работы ветровых электростанций. Результаты подтверждают возможность практической реализации такого энергетического комплекса с точки зрения экономической эффективности.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, парогазовые установки, газовая турбина, энергетический баланс, оптимизация

Вклад авторов

Осама А. — сбор материалов, создание и обработка базы данных, разработка компьютерной программы, анализ данных, написание текста; Сигитов О.Ю. — постановка цели и задачи исследования, научное руководство.

Для цитирования

Osamah A., Sigitov O.Yu. The energy complex of wind and thermal power plants: Development in Iraq // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 2. С. 194–204. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-2-194-204>

Introduction

Energy System Structure of Middle East

The Middle East is central to the functioning of global energy markets. The region is home to five of the world's top 10 oil producers — Saudi Arabia, Iraq, the United Arab Emirates, Iran and Kuwait — and three of the top 20 gas producers. It accounted for more than four in ten barrels of global oil exports in 2022. Total energy supply in Middle East. According to the data recorded on the International Energy Agency (IEA), the total energy supplied in the Middle East reached with an increase in the supply process by 131%, with

a global participation rate of 6% in 2022. Countries across the Middle East face significant energy and climate challenges. Domestic oil and gas demand could increase substantially, driven by economic expansion and population growth. Demand for cooling and desalinated water may also rise significantly as extreme weather conditions tied to climate change, such as heatwaves and droughts, are likely to become more frequent. Nearly 95% of the electricity generated in the Middle East comes from natural gas and oil — the highest share in the world, though countries in the region also have some of the world's best solar resources. As clean energy transitions reduce demand for fossil fuels

globally, producer economies in the region will need to unlock new sources of revenue. As a result, a number of producers are developing plans to build out low-carbon energy industries — leveraging their energy expertise to diversify their economies and energy mixes at the same time.

Iraq, despite its vast hydrocarbon resources, faces a multifaceted energy crisis characterized by chronic electricity shortages, increasing energy demand, deteriorating infrastructure, and heightened environmental degradation. The reliance on fossil fuels not only jeopardizes energy security but also exacerbates public health issues and socio-economic disparities across the nation. The country's energy landscape is marked by a precarious balance between energy supply and demand, with approximately 35% of the population experiencing unreliable access to electricity [1].

This inconsistent energy supply has significant repercussions for economic stability, social welfare, and overall quality of life. Moreover, the environmental implications of Iraq's fossil fuel dependency are dire. The country ranks among the most vulnerable to climate change, facing challenges such as increased desertification, water scarcity, and pollution-related health impacts. Current energy policies and government strategies have predominantly centered on oil and natural gas exploitation, neglecting the potential for diversification through renewable energy sources. Thus, the scope of this research is critical for assessing the barriers to, and avenues for, integrating renewable energy into Iraq's energy system [2].

1. Overview of Iraq Energy System Structure

There are three types of main stations operating in Al-Alaq of different sizes and distributed in different parts of Iraqi cities, some of which are old, some are new, and others have been modernized by adding new units, which are as follows:

Thermal power plants (oil). Iraq has 7 thermal stations to generate energy by heating water and converting it into steam, which is used to rotate steam turbines (with high speeds), which in turn rotate machines to generate electricity with different capacities. The stations are distributed among 6 Iraqi governorates. In the capital, Baghdad, there are two stations in Doura, with a capacity of 640 megawatts, and in southern Baghdad, with a capacity of 355 megawatts. As for Nineveh, it includes the North station, which is the largest thermal station in Iraq, with a capacity of 2,100 megawatts. Salah al-Din Governorate owns the Baiji thermal station with a capacity of 1,320 megawatts, while the Musayyib station, which has a capacity of 1,280 megawatts, is located in Babil Governorate, in Dhi Qar, the Nasiriyah station with a capacity of 800 megawatts, and in Basra, the Hartha station with a capacity of 400 megawatts, making this the total production¹.

Hydro power plants. Iraq produces electrical energy through 8 hydroelectric stations that use the energy contained in water complexes such as dams and waterfalls to rotate water turbines at low speeds, which in turn rotate machines to generate electricity with different capacities. Two hydroelectric power stations are located in Sulaymaniyah Governorate, namely the Darbandikhan Dam station with a capacity of 248 megawatts and the Dokan Dam station with a capacity of 400 megawatts. In Salah al-Din Governorate, there are two Al-Azim Dam stations with a capacity of 27 megawatts and the Samarra Dam station with a capacity of 84 megawatts. Nineveh Governorate includes the Mosul Dam station, which is the largest in Iraq, with a capacity of 1.52 gigawatts, and the second Mosul Dam station with a capacity of 62 megawatts. In Diyala Governorate, the Hamrin Dam station has a capacity of 50 megawatts, and in Anbar Governorate there is a modern dam station with a capacity of 660 megawatts. Thus, the total production of hydroelectric stations reaches 2,583 megawatts².

¹ Sigotov OY, Radin YA. *Wind Energy: A Textbook*. Moscow: RUDN; 2024. p. 1–138. ISBN 978-5-209-12118-3.

² Reliable Prognosis Website. *Weather for 59 locations in Iraq*. Available from: https://rp5.ru/Weather_in_Iraq (accessed: 11.12.2024).

Thermal power plants (natural gas). Iraq relies heavily on gas stations to generate electricity. Iraq has 26 gas stations that work by converting chemical fuel energy into thermal energy to heat gases that are fed into gas turbines, which convert that energy into kinetic energy first, which works to manage the gas turbine, and then into mechanical energy, which works to rotate the rotor in the generator that works with Magnetic field converts mechanical energy into electrical energy. The largest number of stations are located in Baghdad, with 11 gas stations: South Baghdad stations 1 and 2, with capacities of 246 and 400 megawatts, and Al-Dora stations 1 and 2, with capacities of 146 and 700 megawatts. It also includes Al-Taji stations 1 and 2, with capacities of 156 and 160 megawatts, in addition to the Al-Quds 1 stations. And 2 and 3, with capacities of 450 for each of 1 and 2, and a capacity of 500 for station 3. It also contains Al-Sadr station with a capacity of 160 megawatts and Al-Rasheed station 1 with a capacity of 94 megawatts, so the total production of Baghdad gas stations of electrical energy is 3 thousand and 462 megawatts. In Basra, there are 4 gas stations: the Rumaila station with a capacity of 1,460 megawatts, the Shatt al-Basra station with a capacity of 1,250 megawatts, the Zubair station, and the Najibiyah station with a production capacity of 500 megawatts each. Kirkuk Governorate contains two Mulla Abdullah stations with a production capacity of 222 megawatts and Taza with a capacity of 292 megawatts, while Dohuk Governorate includes the Dohuk station with a capacity of 500 megawatts, and in Erbil Governorate the Erbil station with a production capacity of 1,500 megawatts. In turn, Anbar Governorate includes the Anbar gas station with a production capacity of 1,646 megawatts, in Sulaymaniyah, the Sulaymaniyah station with a capacity of 1,500 megawatts, and in Najaf, the Najaf station with a capacity of 430 megawatts. In Diyala, the Mansouriya station has a production capacity of 728 megawatts in addition to the Karbala station, with a production capacity of 250 megawatts, bringing the total production of gas power stations to 14,550 megawatts [3].

Renewable energy sources. Renewable energy in Iraq is energy generated from natural resources such as sunlight, wind, water, rain, and geothermal heat, in addition to biomass energy. Iraq is not a leading country in this field despite the availability of suitable conditions. The heat of the sun, which some may find intense, is suitable for solar power generation. As for the winds, two types are common for Iraq in Summer. The south-east which may reach a speed of 80 kilometers per hour (50 miles per hour), and from mid-June until mid-September, the prevailing winds are north (from the north and northwest), and Iraq is rich in water resources owing to the Tigris and Euphrates rivers and water lakes. In 2006, as a result of the unstable conditions and continuous power outages, Iraq witnessed modest projects to exploit solar energy, and they became more clear and serious in late 2010, with the establishment of the “Renewable Energy Center,” and the development of a program for the years 2012 and 2015, centered on production and distribution, and based on the establishment of stations, the production of solar heaters, and the lighting of public roads. In 2022, the Renewable Energy Center was established in the Iraqi Ministry of Electricity to confront the process of transformation and reliance on clean energy. The following is a description of the most important types of renewable energy in Iraq [4].

Iraq is endowed with significant solar energy potential, receiving an average solar irradiation of 5–7 kWh/m²/day. A study by the U.S. Department of Energy indicates that Iraq could generate over 400 GW of solar energy, making it one of the best locations for solar power in the Middle East.

The wind energy potential in Iraq is also considerable, particularly in regions such as the northern Kurdistan region, where average wind speeds reach suitable levels for energy generation. According to research conducted by Global Wind Energy Council (GWEC), Iraq could harness up to 12 GW of wind energy.

Biomass potential in Iraq remains largely untapped, with agricultural waste and livestock manure providing possible sources for energy production.

The hydropower potential is limited due to the country's geographical features, but there are small-scale hydropower plants on the Tigris and Euphrates rivers [5].

Thus, Iraq energy system structure have basis generation by gas and coal thermal power plant.

In addition there development hydro power plants and other renewable energy sources such as solar PV. Gas turbines constitute about 61% of installed generation capacity, steam 28%, diesel 3%, hydro 8%. Total electricity production from 2000 to 2022 shown in Figure 1.

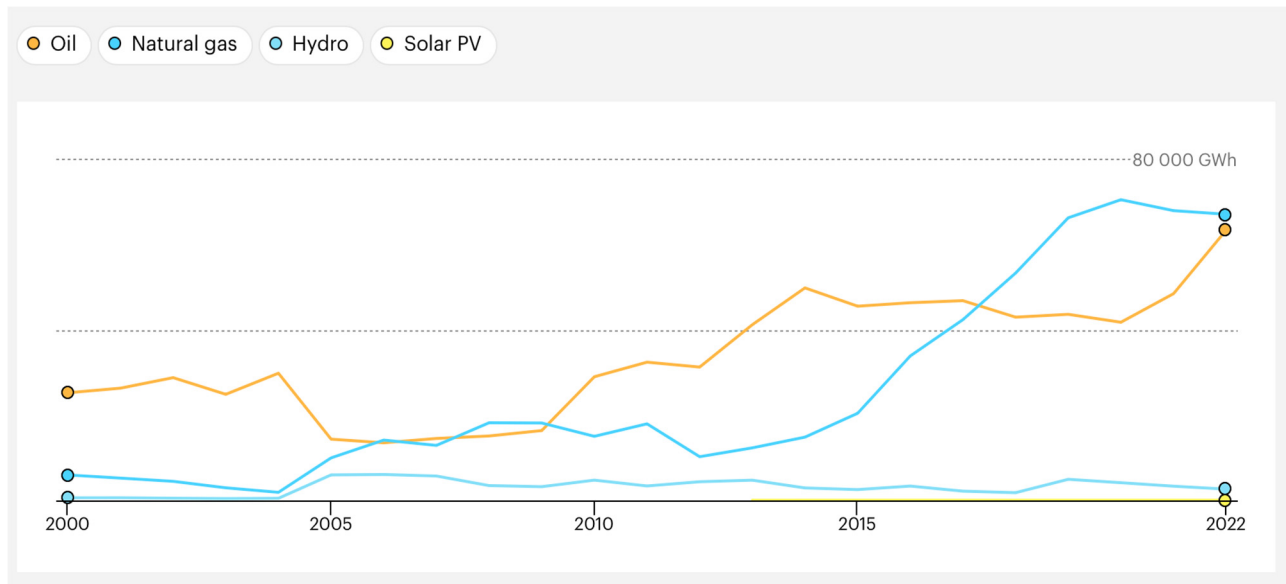


Figure 1. Evolution of electricity generation sources in Iraq since 2000

Source: by EIA. Available from: <https://www.iea.org/countries/iraq> (accessed: 15.09.2024)

2. Wind Farms Placement Investigation in Iraq Condition

For wind farms placement investigation, it is necessary to pay attention for different factors, such as: demand in energy, electricity grid in operation, possibilities of wind turbine component deliver and wind power protentional and others. For these reasons, places near major cities within a radius of 400 km have been chosen [6].

To calculate the wind power potential, attention was paid to changing various parameters such as: wind speed, air density, atmospheric pressure and temperature. It is due to modern wind turbine hub height. Modern wind turbine technology has advanced significantly over the past few decades, leading to larger and more efficient turbines designed to harness wind energy effectively. Here are some key points about wind turbine blade length and hub height.

Modern wind turbine blades can vary widely in length, typically ranging from about 40 meters (131 feet) to over 80 meters (262 feet) for onshore turbines. Offshore turbines can have blades exceeding 80 meters, with some of the largest reaching up to 100 meters (328 feet) or more. Longer blades capture more wind energy due to a larger swept area. This increases the turbine's capacity to generate electricity, especially in areas with lower wind speeds. Advances in materials and design, including the use of lighter and stronger composite materials, have allowed for the development of longer blades without significantly increasing weight [7].

The hub height of modern wind turbines usually ranges from about 80 meters (262 feet) to 150 meters (492 feet) for onshore turbines. Offshore turbines often have even greater hub heights, sometimes exceeding 200 meters (656 feet). The hub height is crucial as wind speed tends to increase with altitude. By placing turbines at higher

elevations, they can access stronger and more consistent winds, leading to higher energy production. The optimal hub height can vary depending on local wind conditions, topography, and environmental considerations. Wind resource assessments are typically conducted to determine the best height for a specific location.

Thus, the trend in the industry is towards larger turbines, with both blade lengths and hub heights increasing to maximize efficiency and energy output. Innovations in floating wind turbine technology are allowing for the placement of turbines in deeper waters, further pushing the limits of hub heights and blade lengths. The increase in size is often coupled with improvements in turbine efficiency and capacity factors, allowing for more energy generation per unit installed capacity¹.

In the result, it is necessary to recalculate mentioned parameters (wind speed, air density, atmospheric pressure) to wind turbine height.

We calculate the wind parameters depending on the external climate conditions using the following mathematical equations [8].

Wind speed was calculated at different height in accordance to formula:

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m,$$

where (h_2) is wind speed at WT altitude, m/s; (h_1) is wind speed at measurement altitude, m/s; h_2 is tower height, m; h_1 is wind speed measurement height (weather vane height), m; m is Hellman coefficient.

Air density changes was calculated in accordance to formula:

$$\rho = 3.4837 \frac{p(h)}{T},$$

where ρ is air density, kg/m³; $p(h)$ is air pressure at height h ; kPa; T is air temperature, K; 3.4837 is specific gas constant of dry air.

Atmospheric pressure at altitude h can be determined using the barometric formula (the basic equation of atmospheric statics):

$$p(h) = p_0 e^{-mg \frac{h-h_0}{RT}},$$

where p_0 is air pressure at sea level, Pa; m is molar mass of gas, g/mol; g is gravity acceleration, m/s².

For calculations, the value of (h) up to a height of 5000 m can be determined from the approximating equation:

$$p(h) = 101.29 - 0.011837h + 4.793 \times 10^{-7} h^2,$$

where h is height from the ground surface, m.

Thus, 5 cities from Iraq were selected, representing a diverse geography from the center, south and north, with close distances not exceeding 400km. The weather website was relied upon to download the required data [4]. A set of mathematical functions were also used to obtain the required results. The map with calculation result presented in Figure 2.

Table 1 represents wind data, air density and power rates for the city of Saladin.

Table 1

Average values of wind energy parameters for Saladin during the year

Parameters	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
V^0 , m/s	1.81	2.06	2.61	2.87	3.29	3.06	2.70	2.29	2.08	1.72	2.35	2.19
t , °C	12.1	13.3	19.3	23.6	29.7	35.0	38.4	39.2	34.9	27.9	20.0	14.8
V^{30} , m/s	2.6	3.0	3.7	4.1	4.7	4.4	3.9	3.3	3.0	2.5	3.4	3.1
P , W	118.71	191.26	543.05	874.69	1640.58	1547.64	1152.32	724.97	485.80	222.52	408.58	253.56

Source: by A. Osamah

³ Reliable Prognosis Website. Weather for 59 locations in Iraq. Available from: https://rp5.ru/Weather_in_Iraq (accessed: 11.12.2024).

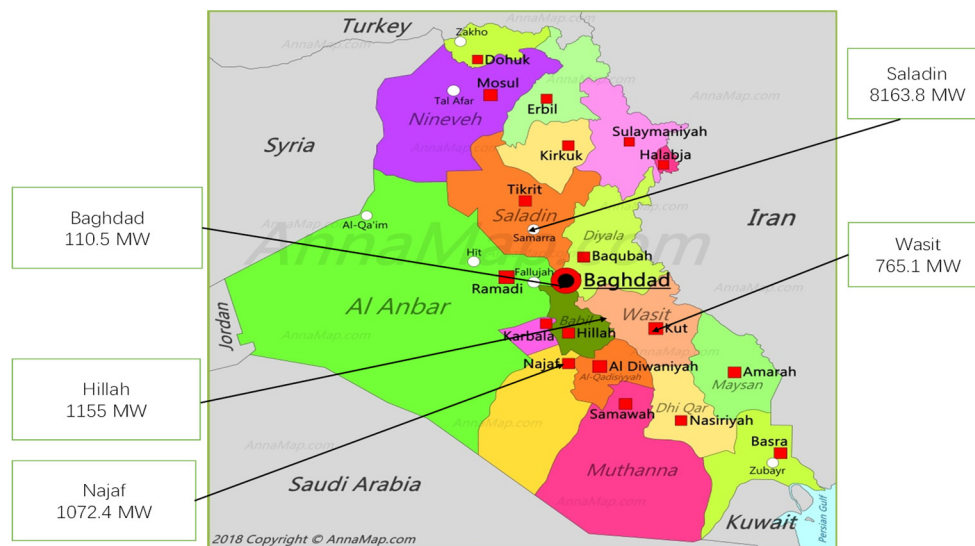


Figure 2. Map of wind power protentional in Iraq

Source: by A. Osamah for Iraq Map. Available from: <https://annamap.com/iraq/> (accessed: 15.09.2024)

3. Flexibility of Energy Systems

Flexibility has become a common by-word for the energy transition. While everyone agrees that we need more flexibility in future power systems, views vary widely on how to achieve this, particularly to improve grid integration and make maximum use of solar and wind potential. To transform our energy system towards one dominated by renewable energy, flexibility has to be harnessed in all parts of the power system. Power system flexibility spans from more flexible generation to stronger transmission and distribution systems, more storage and more flexible demand. Production of heat and synthetic gas (e. g., hydrogen) from renewable electricity is also key for energy system decarbonization in the long term, and once in place it can be a significant additional To transform our energy system towards one dominated by renewable energy, flexibility has to be harnessed in all parts of the power system [9].

Flexibility of Nuclear Power. Nuclear plants are primarily designed to provide baseload power, operating continuously at or near full capacity, they are less flexible when it comes to rapid changes in output, due to thermal stress and safety considerations related to reactor operation, Modern designs, such as small modular reactors (SMRs),

aim to improve flexibility for grid balancing, Continuous operation to meet base demand.

Flexibility of Hydro Power. Hydropower is one of the most flexible generation sources, capable of ramping up or down quickly to respond to demand. Pumped-storage hydropower enhances grid reliability by storing excess energy and releasing it during peak demand, Flexibility depends on water availability, reservoir size, and environmental regulations. Peak demand management and grid balancing.

Flexibility of Thermal Power (Coal or Gas). Traditional coal plants are designed for baseload operation and have slower ramp-up and ramp-down times due to the time needed to heat or cool the boiler. Modern coal plants with advanced technologies (e.g., ultra-supercritical boilers) offer improved flexibility but are still less responsive than gas plants. Baseload power with limited flexibility. Gas turbines and combined cycle gas plants (CCGTs) can ramp up and down quickly, making them suitable for managing variable loads. Gas plants are often used as peaking plants to meet sudden surges in demand. Peaking and backup power to complement variable renewables [10].

Flexible sources like hydro and gas are crucial for integrating variable renewables (e.g., wind and

solar) into the grid. Nuclear and coal plants are less suitable for responding to short-term variability but can still complement renewables for providing

consistent baseload power. Flexibility characteristics of different power generation sources show in Table 2.

Table 2

Comparison of the flexibility of different power generation sources

No.	Type	Quick start ramp rate, %/m	Load ramp up rate, %/m	Load ramp down rate, %/m
Generating plants (conventional)				
1	Gas turbine — simple cycle	22	22.1	21.0
2	Gas turbine combined-cycle power plant	4	2.2	5.0
3	Conventional hydro	6%/s	6%/s	6%/s
4	Nuclear power plants	5.0	1.5	3.0
Generating plants (renewable)				
5	Solar PV	1.0–5.0	0.4	0.4
6	Wind	1.0–10	1.0	1.0
Storage plants				
7	Pumped storage hydro power plant	6%/s	6%/s	6%/s

Source: by A. Osamah

4. Development of an Energy Complex of Wind and Thermal Power Plants in Iraqi Conditions

Iraq is actively developing power complexes that integrate wind farms with fossil fuel-fired power plants to enhance energy security, improve grid stability, and support the integration of renewable energy sources. These hybrid systems leverage the strengths of both wind and fossil fuels such as oil and gas to create a more flexible and resilient energy infrastructure. The key features of hybrid power complexes are that wind farms provide renewable energy, while fossil fuel-fired power plants provide reliable baseload power. This combination ensures a stable power supply even when wind conditions are not favorable. The fossil fuel-fired power plants can quickly ramp up or down to balance the variability of wind power, maintaining grid stability. At the same time, integrating wind power reduces the overall carbon footprint of the power complex, contributing to Iraq's desired climate goals [11].

These hybrid power complexes demonstrate the feasibility and benefits of integrating renewable energy sources with conventional power generation

to enhance energy security, improve grid stability, and support Iraq's climate goals.

This project demonstrates the feasibility and benefits of hybrid power complexes. The hybrid power complex combines wind farms with supercritical coal-fired power plants. This integration enhances the efficiency and flexibility of the power system. Table 2 shows the operating parameters of hybrid power plants. These sources provide comprehensive insights into the development of hybrid power plants and the challenges they face in Iraq. Developing hybrid power plants requires significant investment in infrastructure and technology. Managing the integration of wind and fossil fuels requires advanced control and coordination systems [12]. However, while emissions are reduced, fossil fuel power plants still contribute to pollution and carbon emissions.

Operational Parameters of Hybrid Energy Complexes are shown in Table 3. Capacity Factor is the ratio of actual energy produced to the maximum possible output over a given time, Wind farms have lower capacity factors due to variable wind speeds. Coal plants and hybrid complexes have higher factors when supported by backup sources.

Table 3

Operational parameters of hybrid energy complexes

Parameters	Wind farms	Gas power plants	Hybrid energy complexes
Capacity Factor	25–50% (dependent on wind availability)	60–85%	40–80% (depends on renewable integration and backup)
Ramp Rate	Low to Moderate (limited by wind variability)	High (can adjust power output quickly)	High (depends on backup sources like)
Emissions	Zero (renewable energy source)	Medium (in comparison with coal TPP)	Low to Moderate (renewables reduce overall emissions)
Reliability	Moderate (dependent on weather conditions)	High (continuous base-load power supply)	High (combines reliability of fossil fuels with renewables)

Source: by A. Osamah

Ramp rate is the speed at which a power plant can increase or decrease its output, wind farms are slower due to natural wind constraints, while coal and hybrids (with advanced tech like batteries or gas turbines) can ramp up more quickly.

Emissions parameters show that wind farms are emission-free, coal plants emit significant pollutants, while hybrid complexes aim to minimize emissions by combining renewables and cleaner backup sources. Reliability parameters show that wind farms depend on weather, making them less reliable. Coal plants offer stable power but with environmental costs. Hybrid systems ensure reliability by balancing renewable and conventional energy [13].

5. Results

The final energy complex calculation requires wind and thermal power plants with the maximum power consumption coverage, the wind farm operation modes should be taken into account. The objective function in this case presented as:

$$z = \sum_{i=1}^n C_i N_i \rightarrow \min ,$$

where C_i is lifetime cost of the i -th generating unit, USD; N_i is amount of generation unit; n is amount of generation unit type (wind turbine (WT), gas turbine (GT), combined-cycle gas turbine (CCGT), steam turbine (ST)).

For this energy complex we have different constraints:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{dP_i(t)}{dt} N_i \geq \frac{dP_{wt}(t)}{dt} N_i \\ \sum_{i=1}^n P_i^{\text{range}} N_i \geq \Delta P_{wt} N_i \\ P_i^{\text{nom}} N_i + P_{wt}^b N_i \geq P_{\text{load}} \\ N_i < N_{\text{max}} \end{cases}$$

The constraints of wind farms:

$$\begin{cases} \frac{dP_{wt}(t)}{dt} N_i = \frac{0.1 P_{wt}^{\text{nom}}}{dt} N_i \\ \Delta P_{wt} = 0.9 P_{wt}^{\text{nom}} N_i \\ P_{wt}^b = 0.2 P_{wt}^{\text{nom}} N_i \end{cases}$$

where $\frac{dP_i(t)}{dt}$ is power ramp of i -th generation unit

GT, CCGT, ST, MW/min; $\frac{dP_{wt}(t)}{dt}$ is maximum

power ramp of WT, MW/min; P_i^{range} is available power range of GT, CCGT, ST, MW; ΔP_{wt} is maximum amplitude of WT power change, MW; P_i^{nom} is nominal capacity of GT, CCGT, ST, MW; P_{wt}^b is basis power of WT, MW; P_{wt}^{nom} is nominal capacity of WT, MW.

Considering the above information about energy sources, the Table 4 shows input data for objective function calculation.

Table 4

Input data of energy complex

Power plant type	Energy unit type	Maximum amount of energy unit	Nominal capacity, MW	Low limit of power range, MW	Available power range, MW	Power ramp, MW/min	Lifetime cost, million USD
Wind Farm (WF)	L-100	999	2.5	0	0	0	4
CCPP	230 MW GT13E2 (1GT+1ST)	999	230	92	138	11.5	4000
GT	180 MW	999	180	72	108	21.6	6000

Source: by A. Osamah

Let's consider a case in which it is planned to create an energy complex of wind farms and thermal power plants. Wind turbine (L-100) with a capacity of 2.5 MW and two gas power units (combined cycle power plant GT13E2 (1GT+1ST) and gas turbine) with a capacity of 230 MW and 180 MW are presented as a choice of generating equipment. In accordance with the objective function, constraint equations, and initial information on the maximum amount of energy unit, nominal capacity, low limit of power range available power range, power ramp and lifetime cost, an optimal energy complex was obtained for load with capacity 800 MW. The energy complex includes:

- a wind farm with an installed capacity of 220 MW, including 88 wind turbines
- a combined cycle power plant, which includes 3 units (GT13E2 (1GT+1ST)) with a total installed capacity of 690 MW.

The total lifetime costs for such complex will amount to 12,352 million USD.

Accordingly, such energy complexes can provide their application in the further development of Iraq's energy system. They simultaneously provide technical feasibility in terms of flexibility and economic efficiency.

Conclusion

In conclusion, the development of an integrated energy complex combining wind farms and a thermal power plant in Iraq presents a significant opportunity to diversify and stabilize the country's energy supply. Given Iraq's abundant natural resources, both in terms of wind potential and fossil fuels, this hybrid approach offers several advantages. Wind energy, particularly in regions with

favorable wind patterns, can contribute to reducing the dependence on non-renewable sources and mitigate the environmental impact of power generation. On the other hand, thermal power plants, fueled by Iraq's vast reserves of oil and natural gas, can provide reliable base-load power, especially during periods when wind generation is intermittent.

The integration of these two energy sources can enhance the overall reliability, efficiency, and sustainability of Iraq's energy infrastructure, addressing the country's growing demand for electricity while simultaneously fostering economic growth. Additionally, combining renewable and thermal sources allows for a more flexible and adaptive energy system, capable of balancing supply and demand fluctuations. However, to fully realize the potential of this energy complex, Iraq will need to overcome several challenges, including investments in infrastructure, technology transfer, and the development of local expertise.

Moreover, policy support and regulatory frameworks will be critical in fostering a conducive environment for such projects. Strategic planning that incorporates socio-economic considerations, environmental impacts, and long-term sustainability goals will be essential to ensuring that this hybrid energy complex not only meets Iraq's immediate energy needs but also contributes to global efforts to transition to cleaner and more sustainable energy systems.

Overall, the proposed energy complex in Iraq could serve as a model for other countries in the region, positioning Iraq as a leader in energy innovation and sustainability while improving its energy security and supporting socio-economic development.

References

1. Alshawaf M, Alhajeri NS. Renewable energy-driven desalination for sustainable water production in the Middle East. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2024;17(1):668–78. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2394552> EDN: UPVMNZ
2. McGowan JG., Rogers AL, James F, Manwell JF. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2010. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2394552> ISBN 0-470-01500-4
3. Cochran J, Miller M, Zinaman O, Soonee SK. *Flexibility in 21st century power systems*. ResearchGate. 2014. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61721.pdf> (accessed: 11.12.2024).
4. Hassan Q, Al-Jiboory AK, Sameen AZ, Barakat M, Abdalrahman KYM, Algburi S. Transitioning to Sustainable Economic Resilience through Renewable Energy and Green Hydrogen: The case of Iraq. *Unconventional Resources*. 2024;5:100124. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100124>
5. Algburi S, Rendal E, Jaber ZK, Fakhruddin HF, Amjad A, Sapaev IB, et al. Evaluating the viability and potential of hybrid Solar-Wind renewable energy systems in relation to geographical and environmental factors. *Results in Engineering*. 2024;103473. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103473> EDN: EWCENM
6. Hassan Q, Algburi S, Al-Musawi TJ, Viktor P, Jaszczur M, Barakat M, Sameen AZ, Hussein AH. GIS-based multi-criteria analysis for solar, wind, and biomass energy potential: A case study of Iraq with implications for climate goals. *Results in Engineering*. 2024;22:102212. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102212> EDN: TPRMHI
7. Wu W, Prescott D, Remenyte-Prescott R, Saleh A, Ruano MC. An asset management modelling framework for wind turbine blades considering monitoring system reliability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024;252:110478. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110478> EDN: EDETMW
8. Kale B, Buckingham S, Van Beeck J, Cuerva-Tejero A. Comparison of the wake characteristics and aerodynamic response of a wind turbine under varying atmospheric conditions using WRF-LES-GAD and WRF-LES-GAL wind turbine models. *Renewable Energy*. 2023;216:119051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119051> EDN: TWAQFW
9. Beiron J, Göransson L, Normann F, Johnsson F. Flexibility provision by combined heat and power plants — An evaluation of benefits from a plant and system perspective. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;16:100318. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100318> EDN: UWXGRW
10. Qasim MA, Yaqoob SJ, Bajaj M, Blazek V, Obed AA. Techno-Economic optimization of hybrid power systems for sustainable energy in remote communities of Iraq. *Results in Engineering*. 2025;25:104283. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104283>
11. Nwagu CN, Ujah CO, Kallon DVV, Aigbodion VS. Integrating Solar and Wind Energy into the Electricity Grid for Improved Power Accessibility. *Unconventional Resources*. 2024;100129. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100129> EDN: AIDIQF
12. Aldarraj M, Vega-Márquez B, Pontes B, Mahmood B, Riquelme JC. Addressing energy challenges in Iraq: Forecasting power supply and demand using artificial intelligence models. *Heliyon*. 2024;10(4):e25821. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25821> EDN: YQKBLK
13. Qasim MA, Yaqoob SJ, Bajaj M, Blazek V, Obed AA. Techno-Economic optimization of hybrid power systems for sustainable energy in remote communities of Iraq. *Results in Engineering*. 2025;25:104283. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104283>

About the authors

Aldraisawi Osamah, Master's Student of the Department of Mechanical Engineering of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-5821-9973; e-mail: zhuqiuji1@gmail.com

Oleg Yu. Sigitov, 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

Сведения об авторах

Осама Альдрайсави, магистрант кафедры механики энергетических машин и установок, старший преподаватель кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-5821-9973; e-mail: zhuqiuji1@gmail.com

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; eLIBRARY SPIN-код: 9915-2001, ORCID: 0009-0007-8541-4542; e-mail: OlegSigitov@gmail.com