



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

**2023 Том 24 № 4**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4**

**<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, директор департамента механики и механики 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 Филippo** – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Гурфил Пини** – почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

**Джеа Морисба** – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

**Джесента Джанкарло** – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

**Кавагути Дзюньитиро** – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

**Кадугин 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

**Лишарес 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

**Ясака 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.

**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*  
Компьютерная верстка *Н.В. Маркелова*

**Адрес редакции:**

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

---

Подписано в печать 19.12.2023. Выход в свет 28.12.2023. Формат 60×84/8.

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

Усл. печ. л. 9,77 Тираж 500 экз. Заказ № 1601. 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) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2023 Volume 24 Number 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4

<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, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics 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 Gitas** – 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 (TsNIIMash), 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, Krzhizhanovskiy 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.

### 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*  
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](mailto: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](mailto: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) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Алаторцев К.В., Алаторцев В.Л.</b> Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	295
<b>Alizadeh A., Saltykova O.A., Novinzadeh A.B.</b> Artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for enhanced user experience (Оптимизация навигационных датчиков МЭМС с применением искусственного интеллекта для улучшения пользовательского опыта) .....	305
<b>Разин Д.А., Печников И.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б.</b> Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов .....	323
<b>Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Елисеев С.И., Смирнов А.А., Тимшина М.В., Бронзов Т.П.</b> Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов напряжения для формирования капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения .....	331
<b>Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н.</b> Гнездовидные плоские центральные конфигурации трапециевидной формы в классическом и обобщенном вариантах общей задачи $(4n+1)$ -тел. ....	340
<b>Малинина Н.Л.</b> Синтез структурных схем автоматических устройств на формальных нейронах ..	349
<b>Рзаев Н.С.</b> Исследование прогиба брусьев различной ширины методом Тагучи .....	365

## CONTENTS

<b>Alatortsev K.V., Alatortsev V.L.</b> Improving the efficiency of the remote sensing satellite radio line.....	295
<b>Alizadeh A., Saltykova O.A., Novinzadeh A.B.</b> Artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for enhanced user experience.....	305
<b>Razin D.A., Pechnikov I.S., Frolov K.A., Lyukhter A.B.</b> Laser thermal hardening of gear wheels manufactured from powder materials .....	323
<b>Samokhvalov A.A., Sergushichev K.A., Eliseev S.I., Smirnov A.A., Timshina M.V., Bronzov T.P.</b> High-voltage semiconductor voltage pulse generator for capillary discharge formation in soft X-ray radiation source.....	331
<b>Perepelkina Yu.V., Zadiranov A.N.</b> The nested planar central configurations of a trapezoid form in classical and generalized versions of the general $(4n+1)$ -body problem.....	340
<b>Malinina N.L.</b> The synthesis of structural diagrams of automatic devices on formal neurons.....	349
<b>Rzayev N.S.</b> A study of deflection of rods with different widths using the Taguchi method .....	365



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304

EDN: UWBYIW

УДК 629.76

Научная статья / Research article

## Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

К.В. Алаторцев  , В.Л. Алаторцев 

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

Долгопрудный, Российская Федерация

 alatorsev.kv@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 15 мая 2023 г.

Доработана: 9 сентября 2023 г.

Принята к публикации: 15 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** С появлением расширенных стандартов передачи информационных потоков (типа DVB-S2X) с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) появилась возможность переключать во время работы высокоскоростных радиолиний (ВРЛ) ее параметры для передачи увеличенного (уменьшенного) потока данных. Например, переключение модуляции, коэффициента помехозащищенного LDPC (Low Density Parity Check codes) кодирования и т.п. Это позволяет снизить энергетические затраты на передачу данных и существенно повысить общий информационный поток данных с космических аппаратов на наземные станции приема-обработки информации. Произведены оценки теоретически возможных переходов на соседний режим передачи данных (переход на уровень 0,5–1,5 дБ), что дает суммарный выигрыш в увеличении потока передаваемых данных, который может достигнуть 2,0–2,5 раза при возможном количестве переключений до десяти. На практике, учитывая флуктуационный характер распределения уровня сигнала во время его передачи на наземные станции приема-обработки информации, переключение обеспечивается в меньшем (3–5) числе переходов (при достижении энергетического запаса 3–5 дБ), что приводит к выигрышу в передаче данных 1,5–2,0 раза.

**Ключевые слова:** наземная приемная станция, космические аппараты, высокоскоростная радиолиния передачи информации, энергетическая эффективность радиолинии

### Для цитирования

Алаторцев К.В., Алаторцев В.Л. Повышение эффективности радиолинии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 295–304. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304>

© Алаторцев К.В., Алаторцев В.Л., 2023

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



## Improving the efficiency of the remote sensing satellite radio line

Kirill V. Alatortsev , Vladimir L. Alatortsev 

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, “Phystech”),  
Dolgoprudny, Russian Federation  
✉ alatortsev.kv@mail.ru

### Article history

Received: May 15, 2023

Revised: September 9, 2023

Accepted: September 15, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** With the advent of expanded standards of transfer of information flows (DVB-S2X type) from Earth remote sensing spacecraft (remote sensing), there was an opportunity to switch its parameters for transfer of the increased (reduced) data stream to VHSR operating time. For example, switching of modulation and coefficient of interference-immune LDPC (Low Density Parity Check codes) of coding. It allows to reduce power costs for data transmission and to raise the general information flow of data from remote Sensing Satellites (RSS) to Ground Stations (GS) several times. Estimations of theoretically possible transitions to the next transmission mode of data (transition to the level of 0.5–1.5 dB) are made that gives a total gain in increase in a flow of transmitted data can reach 2.0–2.5 times with the possible number of switchings up to 10. In practice, considering the fluctuation nature of the distribution of the signal level during its transmission to Ground Stations, switching is provided in smaller (3–5) number of transitions (at achievement of a power stock 3–5 dB) that leads to a gain in data transmission by 1.5–2.0 times.

**Keywords:** ground receiving station, spacecraft, high-speed information transmission radio line, energy efficiency of the radio line

### For citation

Alatortsev KV., Alatortsev VL. Improving the efficiency of the remote sensing satellite radio line. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):295–304. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-295-304>

## Введение

Во многих случаях, при передаче спутниковой информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на наземные станции приема-обработки информации (НСПОИ) через высокоскоростную радиолинию (ВРЛ) (рис. 1) поддерживаются постоянными такие параметры, как: несущая частота, модуляция, битовый поток, поляризация и др. [1].

Это приводит к передаче информационных потоков на всем участке сброса данных КА — НСПОИ с повышенным значением энергии на бит передаваемого потока данных (табл. 1), что делает передачу информации ДЗЗ энергетически менее эффективной.

Вместе с тем, с учетом возрастающего количества спутников ДЗЗ в космической группировке, прорабатываются вопросы оптимизации наземной инфраструктуры приема данных ДЗЗ, увеличения пропускной способности радиоли-

нии передачи данных по линии космические аппараты — наземные станции приема-обработки космической информации дистанционного зондирования Земли [2–4].

Целью настоящей работы является получение оценок энергетической избыточности в ВРЛ и выработки стратегии приема информации с космических аппаратов (КА) спутникового мониторинга Земли на основе изменения параметров радиолинии КА — НСПОИ, и получение критерия эффективности использования ВРЛ КА-НСПОИ при передаче данных спутникового мониторинга на наземные станции (НСПОИ).

### 1. Оценки энергетической избыточности ВРЛ КА-НСПОИ

С появлением расширенных стандартов передачи информационных потоков (типа DVB-S2X)<sup>1</sup> [2; 4–16] появилась возможность переключать во время работы ВРЛ ее параметры для передачи увеличенного (уменьшенного) потока данных (напри-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56456-2015. Телевидение вещательное цифровое. Интегрированный приемник-декодер системы спутникового цифрового вещания второго поколения (DVB-S2). Основные параметры. Технические требования. Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.



мер, переключение параметра созвездия модуляции, коэффициента помехозащищенного LDPC кодирования и др. (рис. 2, табл. 3). Это позволяет снизить энергетические затраты на передачу бита данных и повысить общий информационный поток данных с КА на НСПОИ.

При оптимизации различных параметров радиолинии (табл. 3) суммарный выигрыш в передаче данных в ВРЛ КА — НСПОИ может достигать фактически следующего порядка:

$$\text{КПД} = \frac{900 \text{ mbps}}{100 \text{ mbps}} = 9 \approx 10^1 = 1 \text{ порядок,}$$

где сокращение «КПД» подразумевает коэффициент полезного действия; *mbps* — сокращение

«мегабит в секунду» — поток данных в радиолинии КА — НСПОИ.

Увеличение скорости передачи данных может быть достигнуто за счет увеличения количества пунктов приема данных, оптимизации их пространственного распределения (с учетом большой протяженности территории страны), а также за счет переключения параметров радиолинии (модуляция, глубина помехозащищенного кодирования и т.п.), что и обсуждается в настоящей работе.

Повышение скорости передачи данных с КА на НСПОИ может быть достигнуто для наземных станций с различными энергетическими возможностями (радиус зеркала, наличие системы сопровождения и других параметров).

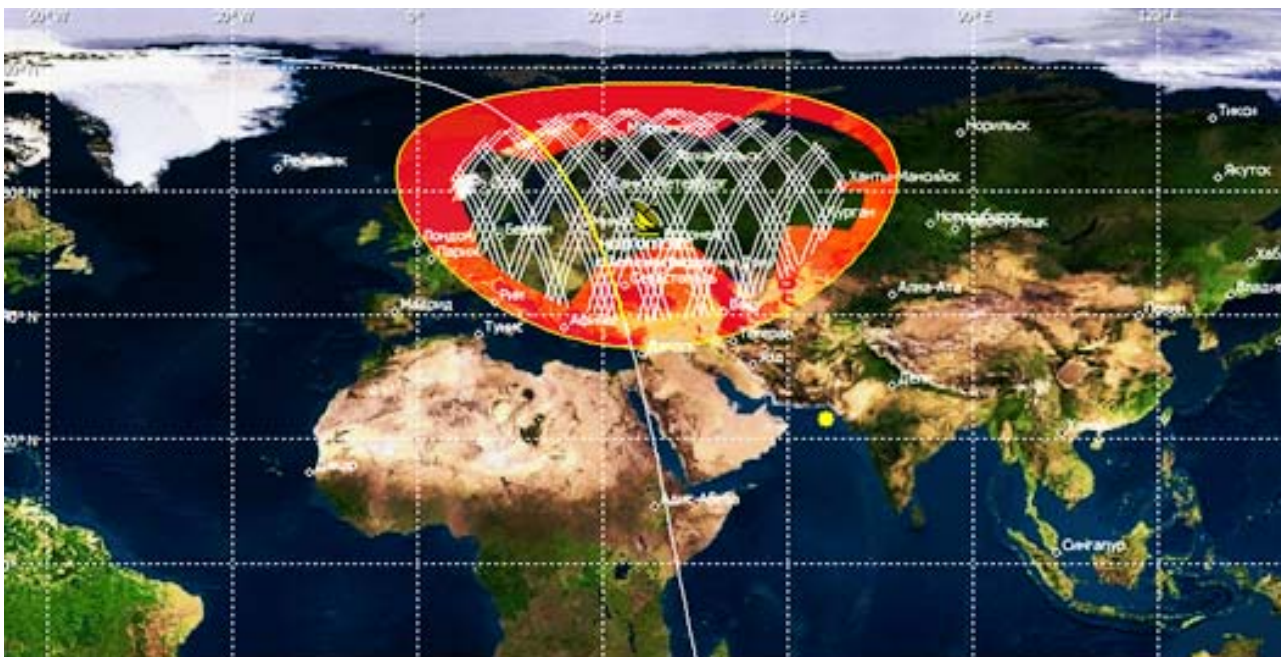


Рис. 1. Сеансы сброса информации с КА ДЗЗ на НСПОИ

Figure 1. Sessions of transmitting of information from Remote Sensing Satellites to Ground Stations

Таблица 1

Энергетический запас в радиолинии при передаче данных с КА ДЗЗ

№ п/п	Высота орбиты МКА $H$ , км	Максимальная наклонная дальность $L_{\max}$ , км	Минимальная наклонная дальность $L_{\min}$ , км	Максимальный избыток энергии в ВРЛ при передаче данных на НСПОИ $\Delta E$ , дБ
1	500	2573	500	14,2
2	700	3067	700	12,8
3	1000	3707	1000	11,4

где  $L_{\min} = A_2 B_2 = H$ ,  $L_{\max} = A_0 B_2 = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}$ .

Table 1

**Energy reserve in the radio line during data transmission from Remote Sensing Satellites**

No.	Orbit height of RSS $H$ , km	Maximum slant range of $L_{max}$ , km	Minimum slant range of $L_{min}$ , km	The maximum excess of energy in VHSR orbit height to GS $\Delta E$ , dB
1	500	2573	500	14.2
2	700	3067	700	12.8
3	1000	3707	1000	11.4

where  $L_{min} = A_2 B_2 = H$ ,  $L_{max} = A_0 B_2 = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}$ .

Таблица 2

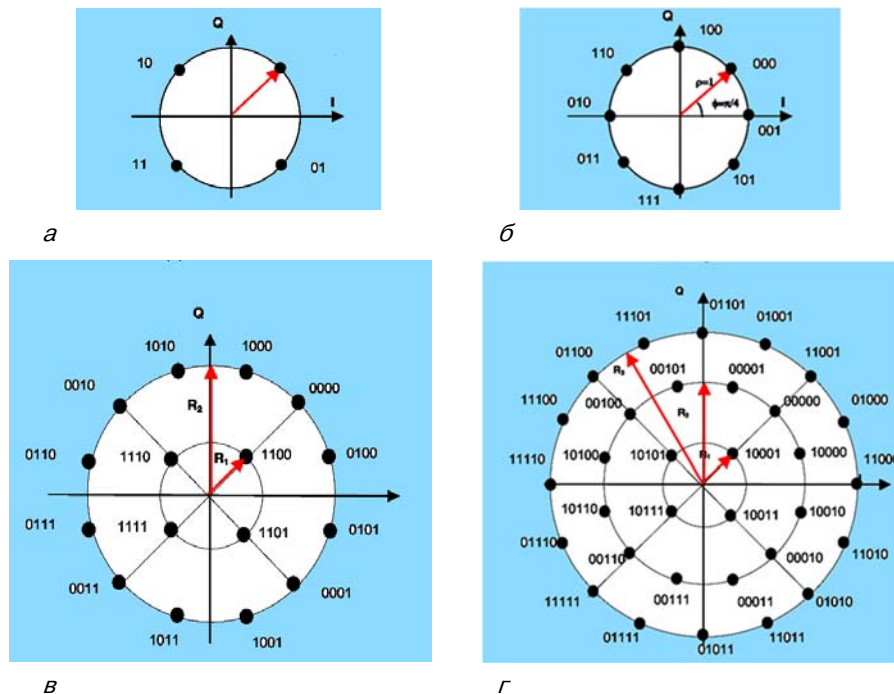
**Время ( $t$ ) нахождения КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НСПОИ**

№ п/п	Высота орбиты КА, $H$ , км	Период обращения $T$ КА, мин / сек	Время в зоне радиовидимости $t$ , мин	Время в зоне радиовидимости $t$ , сек
1	500	94,44 / 5666	11,53	692
2	700	98,59 / 5915	14,08	844
3	1000	104,93 / 6296	17,60	1056

Table 2

**Time ( $t$ ) of finding RSS in the zone of radio visibility of GS**

No.	Height orbits of RSS, $H$ , km	Period RSS, $T$ , minutes/sec	Time in zone of radio visibility $t$ , minutes	Time in zone of radio visibility $t$ , sec
1	500	94.44 / 5666	11.53	692
2	700	98.59 / 5915	14.08	844
3	1000	104.93 / 6296	17.60	1056



**Рис. 2.** Созвездия модуляций DVB-S2X данных КА ДЗЗ: *а*— QPSK; *б*— 8PSK; *в*— 16APSK; *г*— 32APSK  
**Figure 2.** DVB-S2 Modulation Constellation VHSR information of the remote sensing satellites:  
*a*— QPSK; *б*— 8PSK; *в*— 16APSK; *г*— 32APSK

Таблица 3 / Table 3

**Режимы ВРЛ (DVB-S2) сброса информации с КА на НСПОИ [2]**  
**The VHSR (DVB-S2) modes of dumping of information from RSS to Ground Stations [2]**

№ п/п No.	Модуляция / Modulation	Глубина LDPC кодирования / Depth of LDPC encoding	Информационный поток ВРЛ / VRL information bit-rate (mbps)	Полезная информация / Useful information (mbps)	Базовый уровень отличий, дБ / Basic level differences, dB	Отличия между соседними уровнями, $ \Delta E $ , дБ / Differences between adjacent levels $ \Delta E $ , dB
1	QPSK	1/4	400	100	-2,35	—
2	QPSK	1/3	400	133	-1,24	1,11
3	QPSK	2/5	400	160	-0,30	0,96
4	QPSK	1/2	400	200	1,00	0,70
5	QPSK	3/5	400	240	2,23	1,23
6	QPSK	2/3	400	267	3,10	0,87
7	QPSK	3/4	400	300	4,03	0,93
8	QPSK	4/5	400	320	4,68	0,65
9	QPSK	5/6	400	333	5,18	0,50
10	QPSK	8/9	400	356	6,20	1,02
11	QPSK	9/10	400	360	6,42	0,22
12	8PSK	3/5	600	360	5,50	0,98
13	8PSK	2/3	600	400	6,62	1,12
14	8PSK	3/4	600	450	7,91	1,29
15	8PSK	5/6	600	500	9,35	1,44
16	8PSK	8/9	600	533	10,69	1,34
17	8PSK	9/10	600	540	10,98	1,29
18	16APSK	2/3	800	533	8,97	2,01
19	16APSK	3/4	800	600	10,21	1,24
20	16APSK	4/5	800	640	11,03	0,82
21	16APSK	5/6	800	667	11,61	0,58
22	16APSK	8/9	800	711	12,89	1,28
23	16APSK	9/10	800	720	13,13	0,24
24	32APSK	3/4	1000	750	12,73	0,40
25	32APSK	4/5	1000	800	13,64	0,81
26	32APSK	5/6	1000	833	14,28	0,64
27	32APSK	8/9	1000	889	15,69	1,41
28	32APSK	9/10	1000	900	16,05	0,36

Таблица 4

**Угол наблюдения КА ( $\alpha$ ) с НСПОИ для различных наклонных дальностей  $L$**

H/L, км	500	550	600	700	750	800	1000
500	90°	64,4°	55,0°	43,4°	40,5°	37,7°	26,2°
700	x	x	x	90°	67,8°	59,4°	41,3°
1000	x	x	x	x	x	x	90°

H/L, км	1050	1100	1500	2000	2573	3067	3707
500	24,9°	23,6°	13,2°	5,9°	0°	x	x
700	39,4°	37,4°	22,0°	12,3°	6,4°	0°	x
1000	70,9°	63,4°	37,0°	22,5°	14,6°	6,4°	0°

Table 4

**The observation angle of RSS ( $\alpha$ ) from Ground Stations for different slant ranges of  $L$** 

H/L, км	500	550	600	700	750	800	1000
500	90°	64.4°	55.0°	43.4°	40.5°	37.7°	26.2°
700	X	x	x	90°	67.8°	59.4°	41.3°
1000	X	x	x	x	x	x	90°
H/L, км	1050	1100	1500	2000	2573	3067	3707
500	24.9°	23.6°	13.2°	5.9°	0°	x	x
700	39.4°	37.4°	22.0°	12.3°	6.4°	0°	x
1000	70.9°	63.4°	37.0°	22.5°	14.6°	6.4°	0°

В расчетах использованы:

– период  $T$  обращения спутника на орбите

Земли:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi(R + H)^{3/2}(G \cdot M)^{-1/2},$$

– время  $t$  нахождения КА в зоне радиовидимости:

$$t = 2 \arccos(R/(R + H)) \cdot T/(2\pi),$$

а также следующие значения переменных:

$$R = 6371 \text{ км},$$

$$H = 500, 700, 1000 \text{ км},$$

$$M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг},$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

В течение времени нахождения КА в зоне радиовидимости НСПОИ (см. табл. 2) можно неоднократно предусмотреть переключение с режима на режим ВРЛ КА, что позволяет достигнуть многократного увеличения общего объема в потоке передачи данных с КА на НСПОИ.

При теоретически возможном переходе на соседний режим передачи данных (переход на уровень 0,5–1,5 дБ) суммарный выигрыш в увеличении потока передаваемых данных может достигнуть 2,0–2,5 раза. Однако на практике, учитывая флуктуационный характер распределения уровня сигнала во время его передачи на НСПОИ, переключение обеспечивается в меньшем числе переходов (при достижении запаса 3–5 дБ), что приводит к выигрышу в передаче данных только в 1,5–2,0 раза.

## 2. Эффективность использования радиолинии КА-НСПОИ

Приведем оценки эффективности использования параметров радиолинии при передаче информационных потоков от КА до НСПОИ. Расстояние до КА от различных его положений на орбите ( $L_1, L_2, \Delta L = L_1 - L_2$ ) рассчитывается следующим образом (см. обозначения на рис. 3, а): здесь  $\alpha$  — угол места,  $\alpha = (\pi/2) - (\varphi + \gamma)$ , где  $\gamma = 2 \arcsin(R \cos \alpha / (R + H)) \cdot T / (2\pi)$ .

$$\begin{cases} (R + H)^2 = R^2 + L_1^2 + 2 \cdot R \cdot L_1 \cdot \sin \alpha_1 \\ (R + H)^2 = R^2 + L_2^2 + 2 \cdot R \cdot L_2 \cdot \sin \alpha_2 \end{cases}'$$

откуда:  $L_1^2 - L_2^2 = 2 \cdot R \cdot (L_2 \cdot \sin \alpha_2 - L_1 \cdot \sin \alpha_1)$ , в котором  $L_2$  определяется из необходимого дополнительного накопленного запаса энергии для осуществления переключения на следующий уровень конфигурирования параметров ВРЛ:

$$\Delta E = 20 \lg(L_1 / L_2)$$

при значениях  $\Delta E = 3 \dots 5$  дБ, и следующая точка орбиты с заданным  $L_2$  по отношению к предыдущему  $L_1$  определяется:

$$\sin \alpha_2 = ((L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot R) + L_1 \cdot \sin \alpha_1) / L_2.$$

Время движения КА по орбите между ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) (соответственно между ( $\varphi_1, \varphi_2$ )) составляет

$$\Delta t = (T/(2\pi)) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1),$$

где взаимосвязь углов  $\varphi$  и  $\alpha$  следующая (см. табл. 4) из  $\Delta OA_1B_2$ :

$$(R + H) \cdot T / \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = R / \sin \gamma$$

откуда

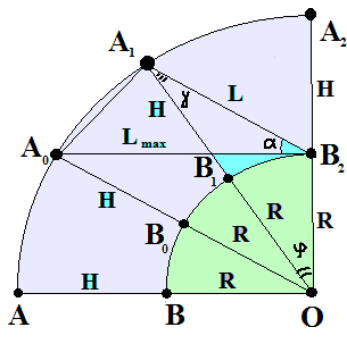
$$\gamma = \arcsin(R \cos \alpha / (R + H))$$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} - (\alpha_i + \gamma_i), \quad i = 1, 2.$$

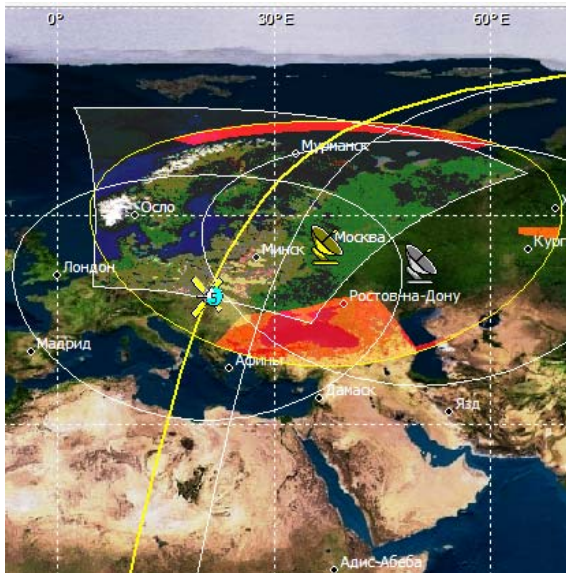
Расчеты выполнены для

$$\sin \alpha = ((R + H)^2 - R^2 + L^2) / (2 \cdot R \cdot L)$$

при  $R = 6371$  км.



а

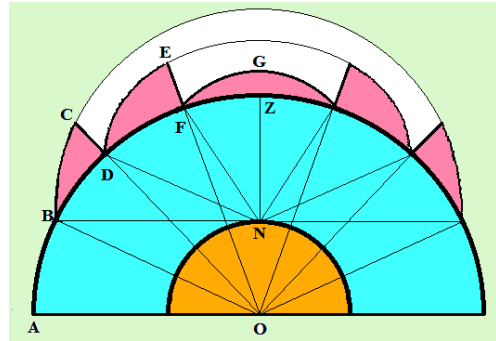


б

**Рис. 3.** Фрагмент половины ( $A_0 - A_1 - A_2$ ) траектории КА в зоне радиовидимости НСПОИ (положение точки  $B_2$ ): а — схема обозначений, б — компьютерное моделирование  
**Figure 3.** Fragment of half ( $A_0 - A_1 - A_2$ ) of the spacecraft trajectory in the radio visibility zone of the Ground Station (point  $B_2$ ): а — notation scheme, б — computer modeling

### 3. Результаты моделирования

Иллюстрация эффекта увеличения энергетической эффективности радиолинии при передаче информации с КА ДЗЗ на НСПОИ представлена на рис. 4. Точка N соответствует расположению наземной станции (НСПОИ),  $R = ON = 6371$  км — радиус Земли, траектория движения КА — суть  $A-B-D-F-Z-...$ , B — точка входа в зону радиовидимости КА со стороны НСПОИ. Для простоты в модельном представлении зоны движения КА до кульминации (Z) разбиты на  $n = 3$  равноугловые сектора:  $BOD, DOF, FOZ$  (O — центр Земли). Движение КА в каждом из секторов происходит с неизменными параметрами радиолинии. В начале каждого из секторов (точки B, D, F, ...) параметры ВРЛ настроены на достаточный в энергетическом плане режим для передачи данных.



**Рис. 4.** Движение КА ДЗЗ в зоне радиовидимости НСПОИ (N) с переключением параметров ВРЛ для повышения ее энергетической эффективности  $\Omega(n, H)$   
**Figure 4.** The movement of the remote sensing satellites in the radio visibility zone of the Ground Stations (N) with switching of the parameters of the VHSR to increase its energy efficiency  $\Omega(n, H)$

Вследствие уменьшения на восходящей части траектории движения расстояния  $L$  от наземной станции до космического аппарата появляется возможность в конце сектора произвести переключение режимов работы радиолинии на более высокоскоростной режим передачи данных пропорционально отношению  $(L_0 / L_1)^2$ , где  $L_0$  суть  $BN$ , а  $L_1$  — соответствующее расстояние от НСПОИ до концов секторов  $DN, FN, ZN, ...$ . Области  $BCD, DEF, FGZ$  — иллюстрируют избыток затрачиваемой энергии при передаче данных с КА на НСПОИ. В предельном случае можно представить непрерывное переключение скорости ВРЛ передачи данных и получить зна-

чительный количественный эффект в повышении эффективности работы ВРЛ. Оценки произведены для кульминационного витка по отношению к стартовой точке, совпадающей с появлением КА в зоне радиовидимости НСПОИ. В качестве оценки энергетической эффективности ВРЛ выбран параметр  $\Omega(n, H)$  :

$$\Omega(n, H) = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (L_0(H, \varphi) / L_i(H, \varphi))^2 = \frac{2}{\arccos\left(\frac{R}{R+H}\right)} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \mathfrak{Z}(\varphi) d\varphi$$

где

$$\mathfrak{Z}(\varphi) = (L_0(H, \varphi) / L(H, \varphi))^2, \\ L(H, \varphi)^2 = (R + H)^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot (R + H) \cdot \cos(\varphi),$$

а секторальный угол ( $\varphi$ ) равняется углам BOD, DOF, FOZ, ...

В частном случае, когда в качестве стартовой точки взята точка входа в зону радиовидимости НСПОИ, значение  $L_0(H, \varphi)$  представляется в упрощенном виде:

$$[L_0(H, \varphi)]^2 = [L_0(H)]^2 = [L_{BN}(H)]^2 = (R + H)^2 - R^2.$$

Отметим, что секторальные углы следует отсчитывать привязанными к вершине  $O$  (центр Земли) вследствие равномерного движения КА по орбите вокруг Земли и упрощения процедуры интегрирования при вычислении параметра эффективности  $\Omega(n, H)$ .

В табл. 5 представлены расчетные параметры секторов движения КА в зоне радиовидимости НСПОИ при двукратном ( $n = 3$ ) переключении параметров ВРЛ.

Смоделированные параметры эффективности ВРЛ для характерных высот  $H = 500, 700, 1000$  км работы КА ДЗЗ представлены в табл. 6.

Таблица 5 / Table 5

**Параметры секторов движения КА в зоне радиовидимости НСПОИ**  
**Parameters of sectors of the movement RSS in zone of radio visibility of GS**

№ п/п No.	Орбита КА ДЗЗ / Orbit of RSS	$H$ , км	500, км	700, км	1000, км
1	Участок $BD$ / $BD$ site	$\varphi_{BOZ}$	22,0°	25,7°	30,2°
		$L_{BN}$	2573 км	3067 км	3707 км
2	Участок $DF$ / $DF$ site	$\varphi_{DOZ}$	14,7°	17,1°	20,1°
		$L_{DN}$	1761 км	2119 км	2596 км
3	Участок $FZ$ / $FZ$ site	$\varphi_{FOZ}$	7,3°	8,6°	10,1°
		$L_{FN}$	983 км	1223 км	1564 км
4	Повышение энергоэффективности ВРЛ / Increase of energy efficiency of VHSR	$\Omega(n, H)$ ( $n = 3$ )	3,33	3,13	2,89

Таблица 6 / Table 6

**Повышение энергетической эффективности ВРЛ:  $\Omega(n, H)$**   
**Increase of power efficiency of VHSR:  $\Omega(n, H)$**

№ п/п / No.	Высота $H$ , км, секторов переключений: / Height $H$ , km, sectors of switchings:	500	700	1000
1	( $n = 1$ )	1,00	1,00	1,00
2	( $n = 2$ )	2,28	2,21	2,11
3	( $n = 3$ )	3,33	3,13	2,89
4	( $n = 5$ )	4,66	4,18	3,68
5	( $n = 10$ )	5,91	5,09	4,32
6	( $n = 100 \rightarrow \infty$ )	7,06	5,91	4,90

В действительности, значения  $\Omega(n, H)$  могут оказаться ниже, если в качестве стартовой точки движения КА выбрать точку с ненулевым углом места ( $\alpha$ ), ответственную за параметр  $\Omega(n, H)$ .

Кроме того, реальные расчеты выполняются с учетом трехмерности траекторий движения КА в околоземном пространстве (см. рис. 1), это приводит к появлению незначительных форм-факторов — поправок порядка единицы.

## Заключение

Следует отметить что конкретный расчет энергетической эффективности  $\Omega(n, H)$ , выполненный с реальными параметрами НСПОИ и ВРЛ, позволяет сформировать технологию подготовки данных для передачи информации с КА на НСПОИ.

Расчеты с энергетическими запасами

$$\Delta E = 1 \dots 5 \text{ дБ}$$

между соседними точками переключения режимов работы ВРЛ приводят к возможному количеству переключения режимов работы ВРЛ от 15 до 3 для траекторий КА в окрестности НСПОИ, близкими к зенитному положению кульминационных точек (см. также рис. 2, б).

## Список литературы

1. Материалы XVIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Москва, Зеленоград. (г. Сочи, 12–17 сентября 2022 г.), 2022. 284 с.
2. Кащеев А.А., Гусев С.И. Алгоритм построения зоны радиовидимости наземных приемных станций для высоконадежных космических радиолиний // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66. Ч. 1. С. 16–21. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-16-21>
3. Ерешко М.В., Борисов А.В. Концептуальные сценарии развития наземной космической инфраструктуры приема целевой информации перспективной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. 2021. № 2 (33). С. 119–129. <https://doi.org/10.33950/spacetech.2308-7625-2021-2-119-129>
4. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В., Почивалин Д.А. Особенности расчета и проектирования высокоскоростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. Вып. 1. С. 52–57. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.52.57>

5. Digital Video Broadcasting (DVB). Part 1 (DVB-S2). DVB Document A171-1, 2015. 115 p. URL: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf) (дата обращения: 12.03.2023)

6. Куренков В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. 461 с.

7. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опыт-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

8. Lloyd J.M. Thermal Imaging Systems. Springer New York; NY Publ.; 1975. 455 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1182-7>

9. Ахметов Р.Н., Баранов Д.А., Еремеев В.В., Фалеев О.В. Технологии обработки данных от систем ДЗЗ АО «РКЦ «Прогресс» // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: материалы XVI научно-технической конференции. Калуга, Манускрипт, 2019. С. 165–173.

10. Paul G., Wiele J.F., White M.H. Solid State Imaging. Noordhoff-Leyden, 1976. 745 p. URL: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf) (дата обращения: 12.03.2023).

11. Антюфриева Л.А. Разработка и исследование алгоритмов обработки сигналов физического уровня спутниковой системы связи: дис. ... канд. тех. наук. М., МФТИ, 2021. 109 с.

12. ESTI TR 102 376-2 V1.2.1 (2021-01) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, New Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), 2021.

13. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые информационные системы: теория и практика. М.: Техносфера, 2012. 1008 с.

14. Ткаченко Д.А., Батов Ю.В., Пузько Д.А., Гельгор А.Л. Оценка эффективности использования цифровой предкоррекции в усилителях мощности спутниковых систем DVB-S2/S2X // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 47–57. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-04>

15. Гельгор А.Л., Ткаченко Д.А., Батов Ю.В., Пузько Д.А. Повышение скорости передачи информации через спутниковые каналы вещания путем применения мультиплексирования сигналов с разделением по уровню мощности // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 11. С. 138–145. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202111-18>

16. Extending DVB-S2. New technology for satellite transmission DVB-S2X. DVB Fact Sheet. Apr. 2018.

## References

1. *Systems of supervision, monitoring and remote sensing of Earth. Materials XVIII of scientific and*

technical conference. Moscow, Zelenograd; 2022. (In Russ.)

2. Kascheev AA, Gusev SI. Construction algorithm for radio visibility zone of Ground Receiving Stations for highly reliable space radio links. *Vestnik of Ryazan state radio engineering University*. 2018;66(1):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-16-21>

3. Ereshko MV, Borisov AV. Conceptual scenarios for development of ground infrastructure for receiving mission payload data from a perspective earth remote sensing satellite constellation. *The Space Engineering and Technology magazine*. 2021;2(33):119–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.33950/spacetech2308-7625-2021-2-119-129>

4. Ershov AN, Berezkin VV, Petrov SV, Pochivalin DA. Features of Calculation and Designing of High-Speed Radio Links of Earth Remote Sensing Spacecraft. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2018;5(1):52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.52.57>

5. *Digital Video Broadcasting (DVB). Part 1 (DVB-S2). DVB Document A171-1*. 2015:115. Available from: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf) (accessed: 12.03.2023).

6. Kurenkov VI. *Bases of design of spacecrafts of optical-electronic supervision of the Earth's surface*. Samara: Samara University Publ.; 2020. (In Russ.)

7. Kirilin AN, Akhmetov RN, Shakhmatov EV, Tkachenko SI, Baklanov AI, Salmin VV, Semkin ND, Tkachenko IS, Goryachkin OV. *Experienced and technological small Stork-2D spacecraft*. Samara: SamNZ RAHN Publ.; 2017. (In Russ.)

8. Lloyd JM. *Thermal Imaging Systems*. Springer New York: NY Publ.; 1975. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1182-7>

9. Akhmetov RN, Baranov DA, Yeremeyev VV, Faleev OV. Technologies of data processing from systems DZZ JSC RKTs “Progress”. *Systems of supervision, monitoring and remote sensing of Earth. Materials XVI of scientific and technical conference*. Kaluga: Manuscript, 2019:165–173. (In Russ.)

10. Paul G, Van de Wiele JF, White MH. *Solid State Imaging*. Noordhoff-Leyden, 1976. Available from: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf) (accessed: 12.03.2023)

11. Antyufriyeva LA. *Development and research of algorithms of processing of signals of physical layer of satellite system of communication*. Thesis Cand.Tech.Sci.: Moscow: MFTI; 2021. (In Russ.)

12. ESTI TR 102 376-2 V1.2.1 (2021-01) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, New Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), 2021.

13. Dvorkovich VP, Dvorkovich AV. *Digital intelligence systems (Theory and practice)*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2012. (In Russ.)

14. Tkachenko DA, Batov YuV, Puzko DA, Gelgor AL. Estimation of effectiveness for application of digital predistortion in high power amplifiers of DVB-S2/S2X satellite systems. *Journal Radioengineering*. 2022;86(12):47–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202212-04>

15. Gelgor AL, Tkachenko DA, Batov YuV, Puzko DA. Application of Layered Division Multiplexing for increasing bitrates of satellite broadcasting channels. *Journal Radioengineering*. 2021;85(11):138–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202111-18>

16. Extending DVB-S2. New technology for satellite transmission DVB-S2X. DVB Fact Sheet. Apr. 2018.

#### Сведения об авторах

**Алаторцев Кирилл Владимирович**, студент факультета аэрокосмических технологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет, МФТИ, «Физтех»), Долгопрудный, Российская Федерация; ORCID: 0009-0001-8920-045X; E-mail: alatortsev.kv@mail.ru

**Алаторцев Владимир Леонидович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Российская Федерация; ORCID: 0009-0003-6001-1692; E-mail: vova.alatortcev.60@mail.ru

#### About the authors

**Kirill V. Alatortsev**, Student of the Faculty of Aerospace Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, «Phystech»), Dolgoprudny, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9348-861X; E-mail: alatortsev.kv@mail.ru

**Vladimir L. Alatortsev**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, MIPT, «Phystech»), Dolgoprudny, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6001-1692; E-mail: vova.alatortcev.60@mail.ru





DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-305-322  
UDC 681.586  
EDN: HMUNNV

Review / Обзор

## Artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for enhanced user experience

Ali Alizadeh<sup>a,b</sup>  , Olga A. Saltykova<sup>a</sup> , Alireza B. Novinzadeh<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> RUDN University, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

 ali.rim.alizadeh@gmail.com

### Article history

Received: June 9, 2023  
Revised: August 21, 2023  
Accepted: September 5, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** This review delves into the key area of artificial intelligence (AI)-driven optimization applied to Microelectromechanical Systems (MEMS) navigation sensors, with the primary objective of enhancing the user experience. Employing a comprehensive research methodology, it extensively explores AI-powered techniques, encompassing sensor fusion, adaptive filtering, calibration, compensation, predictive modeling, and energy efficiency. Through rigorous case studies and empirical evidence, this research provides substantial achievements, including enhanced accuracy, reduced power consumption, heightened reliability, and amplified user satisfaction, across diverse applications such as autonomous vehicles, indoor localization, wearable devices, and unmanned systems. In conclusion, this review highlights the transformative potential of AI-driven optimization in MEMS navigation sensors while acknowledging persistent challenges in computational complexity, data availability, and real-time processing. It advocates for future research focusing on innovative AI methodologies, integration with emerging technologies, adherence to human-centric design principles, and the establishment of rigorous evaluation standards. Such research promises to unlock the full potential of AI-driven optimization, ushering in advanced and user-centric navigation systems, and ultimately improving user experience across diverse areas.

**Keywords:** Microelectromechanical Systems, Artificial Intelligence, Mathematical Modelling, Optimization, Navigation Sensors

### For citation

Alizadeh A, Saltykova OA, Novinzadeh AB. Artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for enhanced user experience. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):305–322. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-305-322>



## Оптимизация навигационных датчиков МЭМС с применением искусственного интеллекта для улучшения пользовательского опыта

А. Ализаде<sup>a,b</sup>, О.А. Салтыкова<sup>a</sup>, А.Б. Новинзаде<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> Технологический университет имени К.Н. Туси, Тегеран, Иран

✉ ali.rim.alizadeh@gmail.com

### История статьи

Поступила в редакцию 9 июня 2023 г.

Доработана: 21 августа 2023 г.

Принята к публикации: 5 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Рассмотрена ключевая область оптимизации на основе искусственного интеллекта (ИИ), применяемого к навигационным датчикам микроэлектромеханических систем (МЭМС). Основная цель — улучшение пользовательского опыта. Используя комплексный подход, исследуются методы, основанные на искусственном интеллекте, включающие слияние датчиков, адаптивную фильтрацию, калибровку, компенсацию, прогнозное моделирование и энергоэффективность. Через строгое проведение кейс-исследований и использование эмпирических данных данное исследование подтверждает значительные достижения, включая повышенную точность, снижение энергопотребления, увеличение надежности и усиление удовлетворенности пользователя, в различных приложениях, таких как автономные транспортные средства, внутреннее определение положения, носимые устройства и беспилотные системы. В заключении данное исследование подчеркивает трансформационный потенциал оптимизации на основе ИИ в навигационных датчиках МЭМС, признавая при этом наличие постоянных вызовов, таких как вычислительная сложность, доступность данных и обработка в реальном времени проведения дальнейших исследований, ориентированных на инновационные методологии ИИ, их интеграцию с передовыми технологиями с условием соблюдения принципов дизайна, ориентированных на человека, и установление строгих стандартов оценки. Подобные исследования позволят использовать весь потенциал механизмов оптимизации на основе методов ИИ, внедряя передовые и ориентированные на пользователя навигационные системы и в конечном итоге повышая уровень удобства пользователей в различных областях применения подобных систем.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы, искусственный интеллект, математическое моделирование, оптимизация, навигационные датчики

### Для цитирования

Alizadeh A., Saltykova O.A., Novinzadeh A.B. Artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for enhanced user experience // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 305-322. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-305-322>

### Introduction

MEMS (Microelectromechanical Systems) navigation sensors have become integral components in a wide range of applications, playing a crucial role in providing accurate and reliable navigation data [1]. These sensors, typically integrated on a small silicon substrate, offer a compact and lightweight solution for measuring various physical parameters, including motion, orientation, and environmental conditions

[2]. The importance of MEMS navigation sensors extends across diverse domains such as autonomous vehicles, robotics, wearable devices, and augmented reality applications [3; 4].

In recent years, the convergence of MEMS technology with artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative force, revolutionizing the optimization and capabilities of navigation sensors [5]. AI, encompassing advanced techniques like machine learning, deep learning, and data analysis, has un-

locked new possibilities for enhancing the user experience and addressing the limitations of traditional MEMS navigation sensors [6]. By leveraging the power of AI, researchers and engineers are able to overcome challenges related to noise, errors, and environmental variations, thus optimizing the performance of MEMS navigation sensors [7].

The growing significance of AI in optimizing MEMS sensors is driven by its potential to revolutionize navigation systems and improve the user experience in various ways. By harnessing AI algorithms and methodologies, MEMS navigation sensors can be fine-tuned to achieve higher accuracy, reliability, and robustness [8]. The integration of AI-driven optimization enables navigation systems to provide precise position tracking, orientation estimation, and motion sensing, enhancing applications ranging from autonomous navigation in vehicles to immersive virtual reality experiences [9].

Furthermore, AI empowers MEMS navigation sensors to adapt and learn from real-time data, leading to dynamic adjustments that enhance their performance in ever-changing environments [10]. Sensor fusion, a key technique enabled by AI, allows the integration of data from multiple sensors, such as accelerometers, gyroscopes, and magnetometers, to derive more accurate and reliable navigation information [11]. This integration not only improves the accuracy of the sensor outputs but also reduces reliance on a single sensor, enhancing system robustness [12].

The optimization of MEMS navigation sensors through AI techniques also offers benefits in terms of energy efficiency and power consumption [13]. With AI-driven algorithms, sensor power can be intelligently managed, leading to optimized energy usage and extended battery life in portable devices. This becomes especially crucial in applications such as wearables and unmanned systems, where power constraints are critical [14].

In this review article, we delve into the realm of artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors for an enhanced user experience. We explore the techniques, applications, and benefits of integrating AI methodologies with MEMS sensors in navigation systems. Through comprehensive analysis and examination of case studies and research findings, we aim to provide insights into the transformative potential of AI in improving the performance and usability of MEMS navigation sensors.

As the field of AI continues to evolve, with advancements in machine learning, deep learning, and data analysis, it is important to understand how these techniques can be effectively harnessed to optimize MEMS navigation sensors. By unlocking the full potential of AI-driven MEMS sensors, we can pave the way for a new era of navigation systems that offer unprecedented accuracy, reliability, and user-centric experiences.

In the subsequent sections of this review article, we will delve into the background of MEMS navigation sensors, discuss the role of artificial intelligence in optimizing these sensors, explore various optimization techniques, present applications and benefits, analyze case studies and research findings, and discuss the challenges and future directions in this exciting field.

Through this comprehensive research, we aim to provide a deeper understanding of the profound impact that artificial intelligence-driven optimization can have on MEMS navigation sensors, ultimately contributing to enhanced user experiences in navigation systems across a multitude of applications.

## 1. Background

MEMS (Microelectromechanical Systems) navigation sensors have emerged as critical components in various applications that require accurate and reliable navigation data. These sensors, based on micro-fabrication techniques, integrate mechanical elements, sensors, and electronics on a common silicon substrate, enabling compact and lightweight solutions for measuring motion, orientation, and environmental conditions [15]. MEMS navigation sensors have found widespread use in domains such as autonomous vehicles, robotics, wearable devices, and augmented reality applications [16; 17].

To understand the significance of artificial intelligence-driven optimization in MEMS navigation sensors, it is important to grasp their working principles and typical applications. MEMS sensors employ various transduction mechanisms to convert mechanical, thermal, or chemical stimuli into electrical signals [18]. In the context of navigation, commonly used MEMS sensors include accelerometers, gyroscopes, and magnetometers [19].

Accelerometers measure acceleration or changes in velocity, providing information about linear motion. Gyroscopes, on the other hand, sense angular velocity or changes in orientation, enabling

measurement of rotational motion. Magnetometers detect changes in magnetic fields, aiding in compass-like functionality for determining heading or direction [20].

Traditionally, MEMS navigation sensors faced challenges and limitations that hindered their ability to provide highly accurate and reliable navigation data. One significant challenge is sensor noise, which can introduce errors and affect the accuracy of measurements. MEMS sensors are susceptible to noise sources such as thermal noise, quantization noise, and external disturbances, which can degrade their performance [21].

Additionally, MEMS sensors can experience errors due to factors like sensor bias, drift, and non-linearity. Sensor bias refers to a systematic offset in the sensor output, even in the absence of motion or external stimuli. Sensor drift represents the gradual change in sensor characteristics over time, leading to inaccuracies in measurement. Nonlinearity refers to deviations from an ideal linear response, affecting the sensor's ability to accurately capture input stimuli [22].

Furthermore, MEMS navigation sensors can be influenced by environmental variations and external interferences [23]. Changes in temperature, humidity, and pressure can affect sensor performance, leading to inaccuracies in navigation data [24]. Interference from electromagnetic fields or magnetic materials can also impact magnetometer readings, affecting the accuracy of heading estimation [25].

These challenges and limitations have motivated researchers and engineers to explore the integration of artificial intelligence techniques to optimize MEMS navigation sensors. By leveraging the power of AI, it becomes possible to overcome these limitations and improve the accuracy, reliability, and robustness of MEMS navigation sensors, ultimately enhancing the user experience in navigation systems [26].

In the subsequent sections of this review article, we will delve into the role of artificial intelligence in optimizing MEMS navigation sensors. By exploring various AI-driven techniques such as machine learning, deep learning, and data analysis, we aim to shed light on how these methodologies can be effectively employed to address the challenges faced by traditional MEMS sensors. Through comprehensive analysis of optimization techniques, case studies, and research findings, we will demonstrate the transformative potential of artificial intelligence in elevating the

performance of MEMS navigation sensors and delivering enhanced user experiences.

Stay tuned as we dive deeper into the realm of artificial intelligence-driven optimization of MEMS navigation sensors and explore the advancements that are reshaping the landscape of navigation systems.

## 2. Role of Artificial Intelligence in MEMS Navigation Sensors

Artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative force in optimizing MEMS (Micro-electromechanical Systems) navigation sensors, offering significant potential for enhancing their performance and improving the user experience. By harnessing AI techniques, such as machine learning and data analysis, researchers and engineers are able to overcome challenges associated with traditional MEMS sensors, including noise, errors, and environmental variations [27].

Fundamentally, artificial intelligence encompasses a range of techniques and methodologies that enable machines to simulate human intelligence and learn from data. Machine learning, a prominent subset of AI, involves training algorithms to recognize patterns and make predictions or decisions without explicit programming. Data analysis techniques complement machine learning by extracting meaningful insights from large datasets, aiding in decision-making processes [28]. In [29], have presented a clear classification for introducing sub-fields of AI that shown in Figure 1 also shows a Depicts a high-level overview of different components, types, and subfields of AI.

Artificial intelligence plays a crucial role in optimizing MEMS navigation sensors by addressing the inherent challenges they face. One such challenge is noise, which can introduce errors and degrade the accuracy of navigation data. By applying AI algorithms, MEMS sensors can effectively filter out noise sources and enhance signal-to-noise ratios, leading to more accurate and reliable measurements [30].

Several specific artificial intelligence algorithms and approaches have been successfully applied to optimize MEMS-based inertial navigation systems. For example, Kalman filtering, a widely used technique, combines measurements from multiple sensors with a mathematical model to estimate the true state of a system. Kalman filtering is effective in

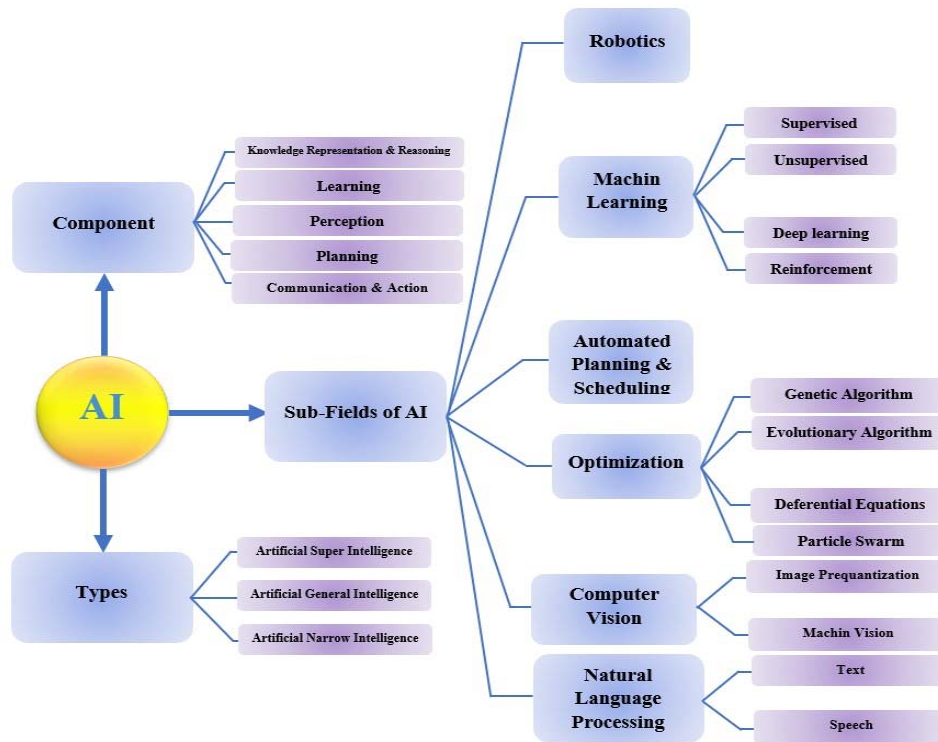
reducing noise, compensating for errors, and providing reliable navigation data [31].

Another approach is neural networks, which are artificial intelligence models inspired by the structure and function of the human brain [32]. Neural networks have shown promise in optimizing MEMS navigation sensors by learning complex relationships between sensor inputs and navigation outputs, improving accuracy and robustness [33].

Additionally, genetic algorithms, a form of evolutionary computation, have been employed to optimize MEMS navigation sensor parameters. By

iteratively searching through a space of possible solutions, genetic algorithms can find optimal configurations for MEMS sensors, enhancing their performance and maximizing user experience [34].

In this review article, we have delving deeper into these specific artificial intelligence algorithms and approaches applied to optimize MEMS navigation sensors. Through comprehensive analysis and examination of case studies and research findings, we aim to demonstrate the efficacy of artificial intelligence in overcoming challenges and enhancing the capabilities of MEMS navigation sensors.



**Figure 1.** AI Components, Types, and Sub-Fields  
 Source : compiled by the author Ali Alizadeh

### 3. Optimization Techniques

Artificial intelligence (AI) has opened up a realm of possibilities for optimizing MEMS (Micro-electro-mechanical Systems) navigation sensors, ultimately enhancing the user experience in navigation systems. Through various AI-driven techniques, MEMS sensors can be fine-tuned and their performance optimized, addressing challenges such as accuracy, reliability, and power consumption. In this section, we have explored several optimization techniques facilitated by artificial intelligence for MEMS navigation sensors.

#### 3.1. Sensor Fusion

Sensor fusion involves the integration of data from multiple sensors to improve accuracy and reliability. By combining measurements from different sensor modalities, such as accelerometers, gyroscopes, and magnetometers, sensor fusion algorithms can derive more accurate and robust navigation information. This integration reduces reliance on a single sensor and compensates for the limitations of individual MEMS navigation sensors, enabling more precise position tracking, orientation estimation, and motion sensing [35].

Due to the fact that MEMS navigation sensors consisting of gyroscopes, accelerometers and magnetometers can give us raw data at least in three X, Y, Z axes and provide access to the location and distance estimation through the existing technique. Many researchers are trying to create a three-dimensional perceptible space for the analysis of the target area or object with the fusion of real-time data received from these sensors with two-dimensional imaging [36].

It seems natural that according to the errors of MEMS sensors, special methods and algorithms should be provided to optimize these errors. Due to the existence of calibration errors and environmental disturbances and the sampling rate of these sensors, the received data usually does not coincide with the time of the imaging frames, so the estimation of the

position of the desired points in the images is not very accurate. For this reason, Dong et al. [37] have investigated various methods for the fusion sensor, the summary of which can be seen briefly and comprehensively in Table 1.

Figure 2 shows an example of imaging data fusion based on Caruso’s proposed algorithm with multi-IMU data that is being optimized with a Kalman filter [36].

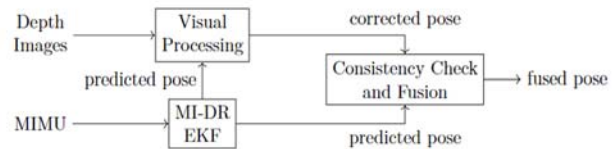


Figure 2. Sensor Data Fusion [36]

Table 1

**Sensor Fusion Methods and Sub-Methods**

Method	Sub-Method	Advantages/ Disadvantages
Standard fusion methods (SFA)	Principal component analysis (PCA) Intensity-hue-saturation (IHS) High-pass filtering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Co-registration of input images at sub-pixel level is required.</li> <li>• One of the main limitations of HIS and Brovey transform is that the number of input multiple spectral bands should be equal or less than three at a time.</li> <li>• SFA generate a fused image from a set of pixels in the various sources. These pixel-level fusion methods are very sensitive to registration accuracy, so that co-registration of input images at sub-pixel level is required.</li> </ul>
	Different arithmetic combination: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brovey transform</li> </ul>	
Artificial Neural Networks (ANNs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BP</li> <li>• SOFM</li> <li>• ARTMAP</li> <li>• RBF neural network</li> <li>• Adaptive Resonance Theory (ART) neural networks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artificial neural networks (ANNs) have proven to be a more powerful and self-adaptive method of pattern recognition as compared to traditional linear and simple nonlinear analyses.</li> <li>• Many of applications indicated that the ANN-based fusion methods had more advantages than traditional statistical methods, especially when input multiple sensor data were incomplete or with much noises.</li> </ul>
Multi-Resolution Analysis-Based Methods	Pyramid: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gaussian Pyramid</li> <li>• Laplacian Pyramid</li> </ul>	Laplacian Pyramid is used for image compression and has a low memory requirement which is its main advantage. On the other hand, the Gaussian Pyramid is used for multi-resolution analysis for image fusion. The Gaussian pyramid is computationally efficient and can be used to down sample an image by a factor of 2 at each level. However, it is not as efficient as the Laplacian pyramid in terms of memory usage.
	Wavelet transform	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Its computational complexity compared to the standard methods.</li> <li>• Spectral content of small objects often lost in the fused images.</li> <li>• It often requires the user to determine appropriate values for certain parameters (such as thresholds).</li> </ul>

### 3.2. Adaptive Filtering

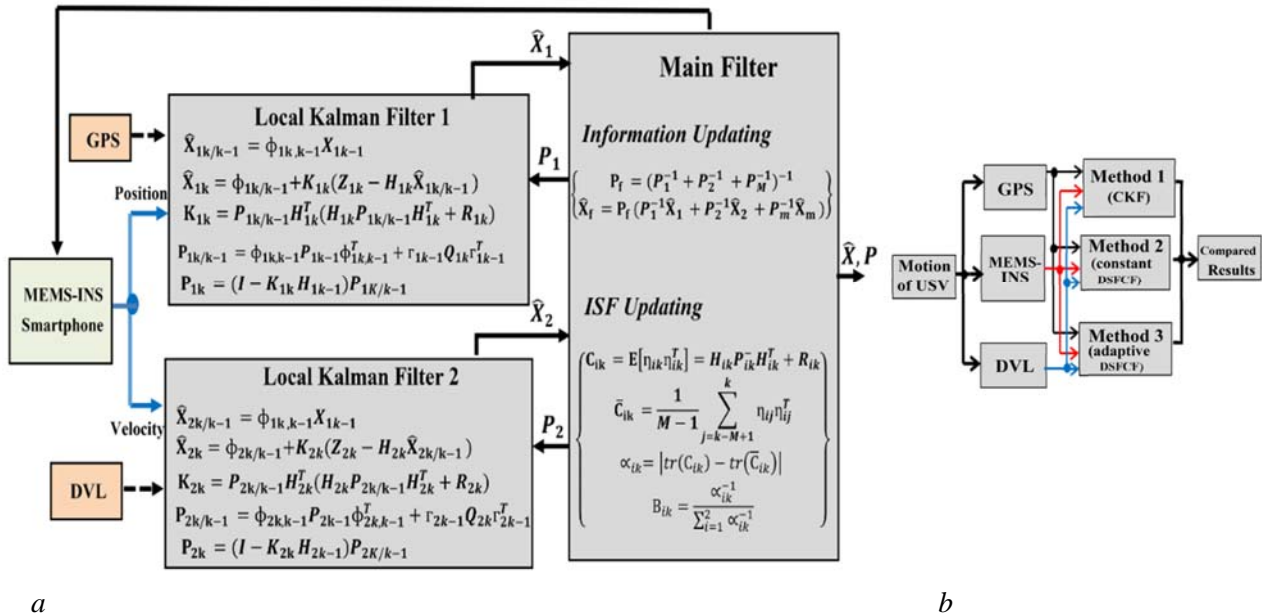
Adaptive filtering techniques play a crucial role in optimizing MEMS navigation sensors in real-time. These algorithms dynamically adjust sensor measurements based on real-time conditions, allowing for accurate tracking and compensation of errors and variations. Adaptive filtering algorithms, such as Kalman filters or particle filters, continuously update sensor outputs based on incoming data, thereby improving the accuracy and reliability of navigation information.

As Bitar, Gavrilov and Khala mentioned [5], various fusion algorithms, such as Kalman Filters (KF) like Extended Kalman Filter (EKF) and Unscented Kalman Filter (UKF), are commonly used for integrating INS and GNSS data. While KF can provide accurate geo-referencing solutions with continuous GNSS signal access, it has limitations such as the need for precise stochastic models for sensor errors, especially for low-end tactical grade and MEMS-based IMUs. Additionally, KF faces challenges related to sensor dependency and observability. To address these limitations, researchers have explored alternative methods based on AI, such as artificial neural networks (ANNs) and genetic algorithms (GA), which offer advantages such as intelligence and robustness in complex and uncertain

systems. AI-based approaches aim to overcome the shortcomings of KF and have been increasingly investigated for INS/GNSS integration.

In order to achieve a more optimal solution, Mostafa et al. [38], has introduced a newly proposed method that enhances the navigation system of unmanned surface vehicles (USVs) by integrating MEMS-INS smartphone sensors with GPS and DVL. The accuracy of GPS and errors in DVL measurements directly impact the efficiency of existing methods. To address this, they have proposed an adaptive data sharing factor combined filter (DSFCF) method as an integrated solution. Their method detects and avoids the least accurate navigation subsystem while correcting USV navigation errors using the most accurate subsystem. Testing on a surface trajectory during GPS and DVL malfunctions has shown that proposed method significantly reduces position errors compared to two popular integrated methods.

Although three methods have been used for integration and integration at the same time, the problem of this combined method is that it does not have the ability to receive data for a cluster of inertial sensors. To accomplish and refine some dimensions of the previous proposed method, comprehensive investigations were conducted to address potential limitations and optimize its performance by Ma et al. [39] (Figure 3).

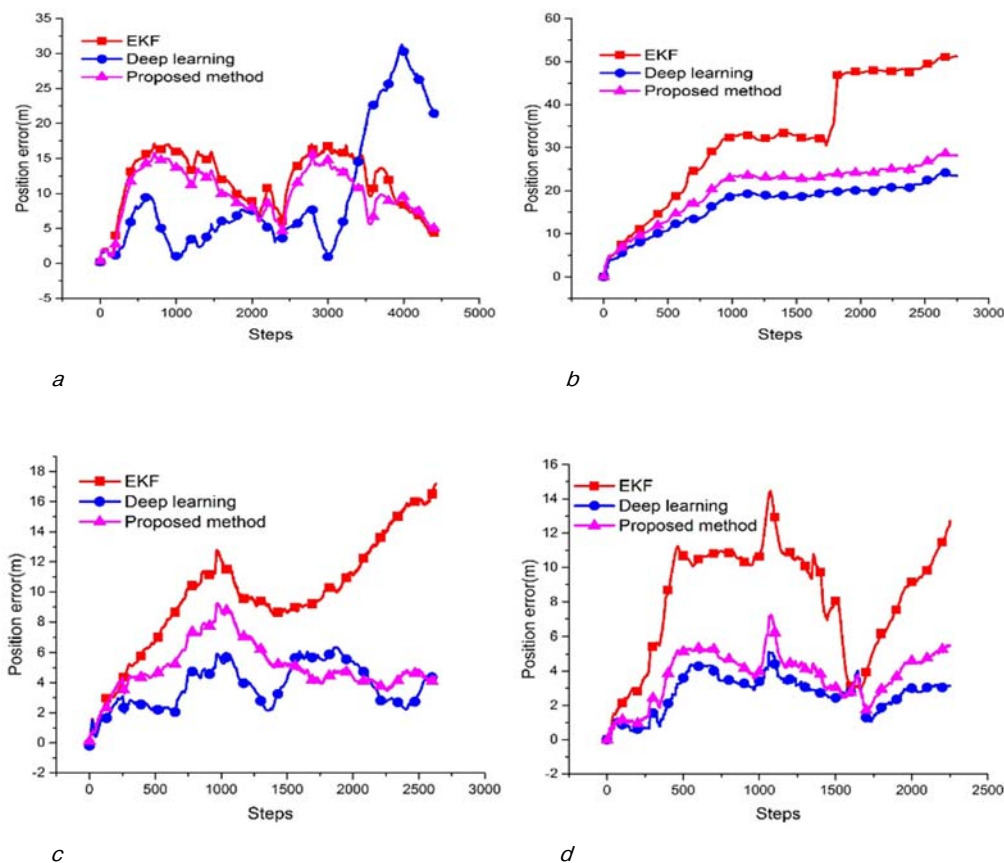


**Figure 3.** Method structure:  
 a — Proposed GPS/DVL/MEMS based on adaptive DSFCF integrated method;  
 b — Block diagram of three integrated methods [39]

They have proposed an adaptive navigation algorithm with deep learning that has achieved accurate and robust navigation for autonomous underwater vehicles (AUVs). The algorithm has utilized deep learning to generate low-frequency position information and has corrected the error accumulation of the navigation system. The  $\chi^2$  rule has been incorporated into the algorithm to identify and exclude outliers in Doppler velocity log (DVL) measurements. Furthermore, an adaptive filter based on the variational Bayesian (VB) method has been employed to estimate navigation information and measurement covariance simultaneously, resulting in further improvements in accuracy. Experimental results using AUV field data have demonstrated that the proposed algorithm has significantly enhanced navigation performance and position accuracy. The algorithm has provided robustness and high accuracy navigation with a normal frequency, thereby meeting

the requirements of various missions. Future work will involve exploring more complex integrated navigation system designs and evaluating the algorithm's performance with different acoustic equipment.

Figure 4 has depicted the position errors of various algorithms in comparison to the ground truth. The proposed method has outperformed others by compensating for sensor deviations and employing a data fusion strategy (Figure 4, *a*). In second test, the deep learning method has successfully enhanced navigation accuracy by addressing outliers in DVL measurements (Figure 4, *b*). The proposed method has demonstrated improved position accuracy when compared to the conventional EKF method (Figure 4, *c, d*). Furthermore, the RMSE results have indicated that the proposed algorithm has achieved robust navigation with enhanced accuracy, surpassing the conventional method by a minimum of 14.4 %.



**Figure 4.** Position error between the ground truth and the estimation of different navigation methods:

*a* — Compares performance of various methods under sensor deviation, highlighting superior accuracy of the proposed method due to advanced data fusion strategy; *b* — Demonstrates error reduction in Test2 with DVL measurement outliers, showcasing the effectiveness of deep learning in enhancing navigation accuracy; *c, d* — Contrast the position accuracy of the proposed method against conventional EKF, indicating the proposed method's comparable accuracy to deep learning approaches [39]



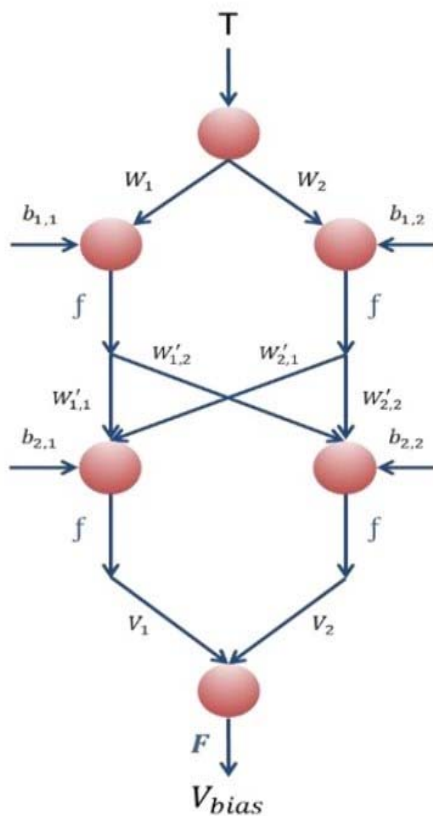
### 3.3. Calibration and Compensation

AI algorithms can be employed to calibrate and compensate for sensor biases and drifts, which can introduce errors in navigation data. Through calibration, ANN techniques determine the systematic offsets or biases in sensor outputs and apply correction factors to eliminate or minimize these errors. Similarly, Back Propagation Neural Network algorithms can track and compensate for sensor drift, which refers to the gradual change in sensor characteristics over time. By continuously monitoring and adjusting sensor parameters, AI-driven calibration and compensation techniques enhance the accuracy and long-term stability of MEMS navigation sensors [40].

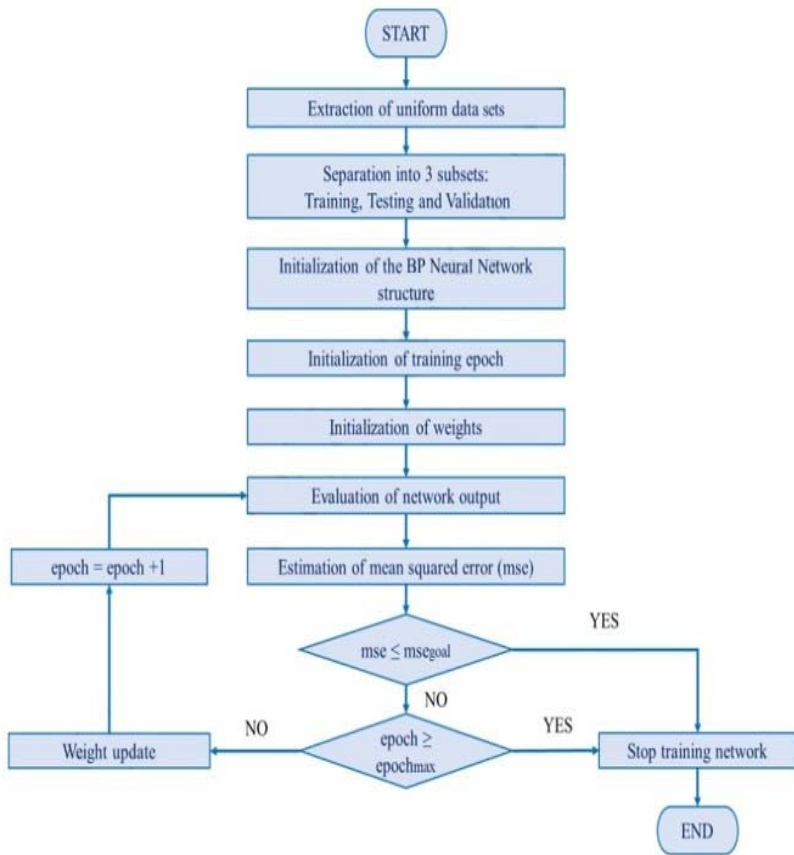
Bias thermal calibration of micro-electromechanical gyroscopes has been a key issue in order to achieve optimal performance in demanding navigational environments, where GPS signals may

encounter adverse conditions such as signal degradation, signal obstructions, or signal attenuation. The conventional modeling approach for capturing abrupt changes in direction within narrow temperature differentials and accounting for sensor hysteresis has not yielded satisfactory results. To address this issue, Fontanella et al. [24], have undertaken an investigation into employing a proposed backpropagation neural network (BPNN) with the Lorenzberg — Marquardt algorithm and the MATLAB neural network toolbox for the process of polynomial fitting that shown in Figure 5.

Subsequently, by applying the Kolmogorov — Smirnov test, the adherence of this dataset to a uniform distribution was confirmed, thereby establishing the goodness-of-fit. The outcomes substantiated a remarkable 20 % enhancement in the precision of the flight attitude, aligning with the stipulated requirements mandated by prevailing regulations.



a



b

**Figure 5.** Back Propagation Neural Network:   
 a — Structure of the Back Propagation Neural Network adopted for modeling thermal drift;   
 b — Flow chart of the Back Propagation Neural Network training process [41]

In a study pertaining to the calibration of micro-electromechanical sensors Huang et al [41], have introduced an innovative indoor positioning system that utilizes smartphone MEMS sensors. The system has employed a Pedestrian Dead Reckoning (PDR) algorithm, leveraging the accelerometer, gyroscope, and magnetometer sensors for continuous relative position information. It has incorporated an offline phase where sensor data has been collected to construct a training dataset, and a deep learning model has been developed using TensorFlow to detect indoor turning points. In the online phase, the trained model has been used to identify turning points, and a particle filter algorithm has been applied for error calibration. The system's performance has been validated through extensive experiments in a real indoor environment. However, limitations have included reduced accuracy in environments with few turning points and decreased computational efficiency when using a large number of particles in the filter algorithm.

### **3.4. Predictive Modeling**

Machine learning techniques can be leveraged to develop predictive models that anticipate and compensate for sensor errors. By training algorithms on historical data, machine learning models can learn complex relationships between sensor inputs and outputs, enabling accurate prediction of sensor behavior. These predictive models can be used to estimate and correct for errors, improving the overall accuracy and reliability of MEMS navigation sensors [42].

Regarding this matter Nevlydov et al. [43] have explored the development of a predictive model for classifying the state of a robot using machine learning techniques and data from MEMS sensors. Through experiments, a three-axis MEMS gyroscope was used to investigate the effectiveness of various algorithms in real-time state classification. Supervised machine learning algorithms, including Support Vector Machines, k-nearest neighbors, and Decision Trees, have been evaluated, with weighted k-nearest neighbors and bagged trees showing the best performance, achieving an accuracy of approximately 89 %. The study highlights the potential of machine learning in developing accurate and reliable predictive models to enhance the decision-making system of robots.

### **3.5. Energy Efficiency**

Artificial intelligence also offers opportunities to optimize power consumption and extend the bat-

tery life of MEMS navigation sensors. AI-based techniques can intelligently manage sensor power, optimizing energy usage based on the specific requirements and operating conditions. By dynamically adjusting power levels and sampling rates, AI algorithms can minimize power consumption while maintaining adequate performance. This becomes especially important in applications such as wearable devices and unmanned systems, where energy efficiency is critical [10; 11].

In this regard Fouché and Malekian [44], have developed a comprehensive system from first principles to enable autonomous navigation and remote fire detection. The system has utilized a low-cost inertial measurement unit with MEMS sensors to measure the aircraft's orientation, while line-of-sight guidance principles have facilitated real-time trajectory calculations for autonomous navigation. Stabilized flight has been achieved through the implementation of a stabilization control system with PID controllers. Fire detection has been accomplished by utilizing low-cost air composition sensors connected to an artificial neural network. For efficient flight planning, path-planning algorithms have been employed, utilizing equirectangular projection, terrain meshes, and AI techniques to minimize travel distance and maximize energy efficiency. The system has achieved the desired outcomes, surpassing specifications in fire detection and autonomous waypoint navigation. However, the system's applicability in challenging environments could be further enhanced by incorporating advanced attitude estimation approaches. The flight control has effectively stabilized the system, enabling it to operate under harsh conditions commonly experienced by unmanned aircraft.

## **4. Case Studies and Research Findings**

AI-driven optimization of MEMS navigation sensors offers significant advantages across various applications, enhancing user experience. This section explores transformative impacts, including increased accuracy, reduced power consumption, improved reliability, and enhanced user satisfaction. Case studies and research findings demonstrate successful implementations, showcasing performance enhancements and real-world applications.

- Through AI-driven optimization, MEMS navigation sensors bring several benefits and improvements to these applications:

Table 2

**Comprehensive Analysis of Case Studies and Optimization Results**

Case	Research Objective	Approaches	Advantage	Ref
MEMS IMU De-Noising	The research tackles error divergence in standalone MEMS INS, focusing on weak or blocked GPS signals. It collects gyroscope data from a specific MEMS IMU model to improve accuracy.	Designing and training the LSTM-RNN model to effectively filter and de-noise the MEMS IMU gyroscope signals, thereby improving the accuracy of the MEMS INS.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enhancing the accuracy of a standalone MEMS Inertial Navigation System (INS)</li> <li>Resulting in reduced standard deviation and attitude errors.</li> </ul>	[45]
UAS (Drone)	Developed a flexible software framework for drones, enabling easy testing of AI-driven navigation and obstacle avoidance modules, while addressing limitations of existing frameworks like Ardupilot too.	A versatile obstacle avoidance library was developed with three modules: MEMS IMU sensor Module, Mavlink Communication Module, and Sensor Fusion Module. The research followed a methodology involving sensor selection, simulation testing, and open datasets. Optimization approaches were applied in software architecture, obstacle avoidance, and artificial intelligence.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducing the probability of hitting the target.</li> <li>Quick reaction to new obstacles.</li> <li>A wide range of UAV environment settings is included in the designed library.</li> <li>The library's flexibility and adaptability make it suitable for commercial drone applications, such as aerial photography, delivery services, inspection tasks, and more.</li> </ul>	[46]
Human activity detection (wearable technologies)	Improving Human Activity Recognition (HAR) using MEMS sensor technology in smartphones. By applying ML techniques and a custom-built Bi-LSTM model, the study aims to accurately classify human motion activities. The goal is to develop a baseline-level technology for HAR with applications in healthcare and fitness industries.	The research proposed a custom-built DL model using the Bi-LSTM neural network architecture for human activity recognition. Through hyperparameter fine-tuning, the model achieved an accuracy of 98.1 % by accurately classifying nine different human motion activities. The implementation of this model using data from mobile phone sensors resulted in significant improvements in activity classification.	The proposed Bi-LSTM model achieves a high accuracy of 98.1 % in human activity recognition, outperforming other models. It effectively handles sequential motion data, identifies fine-grained patterns, and is practical using mobile phone sensors.	[47]
Human activity detection (Arm Motions)	Addressing sensor drift, noise, and calibration, handling data complexity, and optimizing the motion capture system for enhanced accuracy and applicability in different domains.	In the research, optimization approaches were used to improve the motion capture and recognition system. This involved designing and optimizing the MEMS sensor network system to address sensor drift, noise, and calibration. The convergence of the Kernel Perceptron Algorithm (KPA) was optimized to enhance its classification and recognition capabilities. The performance of KPA was compared with the Support Vector Machine (SVM) algorithm to balance speed and accuracy. The research aimed to optimize both hardware and software components for high-quality motion data and reliable arm motion recognition.	Improving the classification and recognition capabilities, allowing for accurate identification of different arm motions, including complex and dynamic movements.	[48]
Unmanned Aircraft Vehicle (UAV)	The main challenge for researchers in this research is to efficiently track and process the large volume of data generated by unmanned aerial vehicles (UAVs) at low cost and with high accuracy.	The researchers employ iterative learning control, Kalman filtering, and gradient descent algorithms to optimize data processing and achieve accurate trajectory tracking. The solution addresses the challenges of processing large volumes of data generated by UAVs in a cost-effective and efficient manner, providing improved accuracy and reduced time complexity.	Cost-effective UAV trajectory tracking, high accuracy with a low tracking error of 0.09 %, improved measurement accuracy of 92 %, reduced time complexity, and faster data processing. These advancements contribute to more affordable, accurate, and efficient UAV operations in various domains.	[49]
UAV	Developing accurate and efficient trajectory control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) in autonomous flight mode using neural network algorithms.	By using a numerical-analytical approach, suitable technical solutions are selected for constructing platformless inertial navigation systems (BINS) for micro and small UAVs. Through simulations and experiments with different neural network structures, such as ELM-Kalman and WANN-RNN-Madgwick algorithms, the aim is to improve navigation accuracy and adapt to the absence of GPS signals. The research aims to optimize the neural network architecture and parameters for precise trajectory control and error compensation in the UAV's navigation system.	The proposed technique and solution enhance UAV trajectory control during autonomous flight by utilizing neural network algorithms and advanced inertial navigation systems. It achieves superior learning accuracy and faster adaptation compared to alternative approaches. This research improves the precision and efficiency of micro and small UAVs in performing tasks without relying on GPS signals.	[50]

Case	Research Objective	Approaches	Advantage	Ref
UAV	Limitations of low-cost IMUs, accurately modeling the vehicle dynamics, integrating machine learning techniques, ensuring robustness and generalization, and conducting thorough performance evaluations. By overcoming these challenges, researchers aim to enhance UAV autonomous navigation in GNSS-denied environments without adding extra load to the vehicle.	This research proposes a hybrid machine learning approach to enhance unmanned aerial vehicle (UAV) navigation accuracy in GNSS-denied environments. The approach utilizes the UAV vehicle dynamic model and previous flight information during GNSS availability to train machine learning algorithms. These algorithms predict the vehicle states, such as position, velocity, and attitudes, during GNSS outages, mitigating the massive drift experienced by low-cost inertial measurement units (IMUs). The ML-VDM algorithm eliminates the need for modeling the UAV parameters, which can be time-consuming and prone to errors.	Test scenarios demonstrate the effectiveness of the approach, achieving significantly reduced drift compared to standalone IMUs during outages, with RMSE values within an acceptable range for many UAV applications.	[51]
UAV (Multi-Rotor)	Developing a noninvasive hybrid computer interface (HCI) system using EOG and EEG signals for indoor target searching with a multi-rotor aircraft.	This research proposes a hybrid machine learning approach to enhance UAV navigation accuracy in GNSS-denied environments by utilizing the vehicle dynamic model and previous flight data. The ML algorithms predict vehicle states during GNSS outages, reducing drift in low-cost IMUs. The system also incorporates a hybrid computer interface for indoor target searching using EOG and MI EEG signals, with SVM for classification and obstacle avoidance. The solution combines signal processing, feature extraction, classification, and navigation techniques to achieve the objectives.	The proposed hybrid machine learning approach for UAV navigation in GNSS-denied environments offers advantages such as accurate prediction of vehicle states during GNSS outages, mitigating drift in low-cost IMUs. The ML-VDM algorithm eliminates the need for complex UAV parameter modeling. The hybrid computer interface system combines EOG and MI EEG signals, enabling effective human-computer interaction and improved navigation in complex environments.	[52]
UAV	The researchers face several challenges in this research. Their main goal is to accurately estimate air data parameters for a small fixed-wing UAV using low-cost pressure sensors and machine learning models. They need to address potential errors introduced during training with wind tunnel data and improve accuracy for the benchmark flight test.	The technique used in this research involves embedding low-cost pressure sensors into a small UAV's surface and employing machine learning algorithms (NNs and LR) to estimate air data parameters. The solution includes training the models using wind tunnel and flight data, considering factors like sensor placement and basis function expansions, and addressing potential errors in the wind tunnel data. The goal is to accurately estimate air data parameters for small UAVs in a cost-effective manner.	The technique and solution have several advantages. The machine learning algorithms enable accurate estimation of air data parameters. The flexibility in MEMS sensor placement allows for optimization. The method addresses potential errors in wind tunnel data and undergoes rigorous validation through extensive testing.	[53]
Cube Sat	The researchers in this study face several challenges. The first objective is to develop and validate algorithms for autonomous collision avoidance (CAM) in space missions. This involves implementing collision avoidance algorithms and using artificial intelligence for planning and decision-making during CAM operations. The second objective is to characterize untraceable space debris objects and improve the debris environmental model. The third objective is to model the upper atmosphere and thermomechanical loads for more accurate re-entry prediction. Additionally, selecting the operational orbit and disposal strategy, as well as ensuring compliance with space debris mitigation regulations, are crucial aspects of the mission design.	The research on e. Cube missions incorporates several optimizations approaches to enhance its objectives. One optimization approach is the development and implementation of efficient algorithms for debris analysis. These algorithms aim to improve the accuracy and speed of identifying and characterizing space debris. Another optimization approach involves optimizing the data collection process for upper atmosphere characterization. This includes designing sensors and instruments that can collect relevant data with high precision and minimal resource utilization.	The advanced collision avoidance system with optimized algorithms enhances the efficiency and effectiveness of avoiding potential collisions in space, reducing the risk of damage to satellites and spacecraft. Overall, these advancements contribute to improved sustainability and safety in space missions, making them more reliable and successful.	[54]

Ending of the Table 2

Case	Research Objective	Approaches	Advantage	Ref
Land Vehicle Navigation	The researchers aim to develop a reliable and accurate land vehicle navigation system by integrating MEMS-based GNSS and INS. The challenge lies in dealing with stochastic errors in inertial sensors and instability during GNSS outages.	The researchers employ a hybrid denoising algorithm, combining wavelet transform and support vector machine (SVM), to improve the signal-to-noise ratio of MEMS-INS measurements. This helps eliminate short-term and long-term errors while preserving vehicle dynamics. Additionally, they develop a data fusion method using SVM to predict and correct positioning errors during GNSS outages. By training the SVM model with simulated data, they achieve accurate positioning results even in the absence of GNSS. The proposed technique effectively reduces sensor noise, enhances positioning accuracy, and maintains real-time performance.	The technique's real-time performance and computational efficiency make it suitable for practical implementation. Overall, the approach enhances the reliability and accuracy of land vehicle positioning while mitigating the challenges posed by GNSS signal outages and stochastic error characteristics of inertial sensors.	[55]
CubeSat	Developing and validate a control approach that can effectively allocate efforts among actuators in an over-actuated system, specifically in the context of a space debris removal mission using a deployable net on a CubeSat, while considering failures and optimizing computational time.	The research utilizes a fuzzy controller combined with control allocation to stabilize the CubeSat and calculate thruster efforts. The controller considers disturbances from net-fired bullets and maintains stability. The proposed solution achieves stable recovery within a reasonable timeframe and shows comparable results to traditional control methods. It also demonstrates robustness in various scenarios, including thruster failure.	Simulation results show successful stability recovery within a reasonable time, comparable to a traditional control allocation method. The proposed approach demonstrates robustness in various scenarios, including a thruster failure.	[56]
Land Vehicle Navigation	This research addresses the challenge of effectively blending GNSS and INS data for accurate positioning in harsh environments.	The technique used in the research involves a two-tier robust fusion scheme. The first tier utilizes a Support Vector Regression-based Adapted Kalman Filter (SVR-AKF) to fuse GNSS and INS data and improve positioning accuracy. The SVR-AKF autonomously adjusts the covariance matrix to adapt to varying GNSS observation quality in complex urban environments. The second tier involves an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) to predict and compensate for INS errors during GNSS outages. This enhances the reliability of the positioning system. The solution proposed in the research significantly improves the overall reliability and positioning performance of land vehicle navigation in GNSS-challenged environments. Experimental tests validate the feasibility and effectiveness of the proposed methodology.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enhanced Positioning Accuracy</li> <li>• Robustness in Complex Urban Environments</li> <li>• Compensation for GNSS Outages</li> <li>• Feasibility and Effectiveness</li> </ul> <p>Improving accuracy, robustness, and reliability for low-cost GNSS/INS integrated land vehicle navigation systems by addressing challenges of poor GNSS accuracy in complex urban environments and position errors during GNSS outages.</p>	[57]

• *Increased Accuracy:* AI techniques enable improved sensor calibration, compensation for errors, and adaptive filtering, resulting in highly accurate navigation data. This accuracy translates into precise positioning, reliable motion tracking, and orientation estimation.

• *Reduced Power Consumption:* AI-based energy optimization techniques can intelligently manage power usage, reducing the energy footprint of MEMS navigation sensors. This leads to extended battery life in portable devices and efficient power utilization in resource-constrained systems.

• *Improved Reliability:* AI-driven optimization mitigates sensor noise, compensates for biases and drifts, and accounts for environmental variations. These improvements enhance the reliability of MEMS navigation sensors, ensuring consistent and trustworthy navigation information.

• *Enhanced User Satisfaction:* The combination of increased accuracy, reduced power consumption, and improved reliability contributes to an enhanced user experience. Users can benefit from precise navigation, seamless operation, and confidence in the performance of devices or systems relying on MEMS navigation sensors.



**Figure 6.** Nano Satellite. The ASTERIA Satellite. Credit: NASA/JPL-Caltech  
Source: author's photo

Liddle et al. [58] have examined the challenges related to scientific missions utilizing the advantages of nanosatellites and CubeSats, including cost-effectiveness and the utilization of new technological advances. They have highlighted the importance of MEMS navigation sensors in supporting this strategy. Figure 6 has presented a view of a CubeSat, illustrating its integration within this framework [59].

## 5. Challenges and Future Directions

While artificial intelligence (AI)-driven optimization holds immense potential for enhancing the user experience with MEMS (Microelectromechanical Systems) navigation sensors, several challenges and limitations must be addressed. In this section, we will discuss the key challenges faced in implementing AI-driven optimization in MEMS navigation sensors and explore potential research directions and future developments that can further leverage AI techniques to improve user experiences.

### 5.1. Computational Complexity

One of the primary challenges in AI-driven optimization is the computational complexity associated with processing large volumes of sensor data in real-time. MEMS navigation sensors generate a continuous stream of data that needs to be processed and analyzed to extract meaningful information. Implementing complex AI algorithms, such as deep learning models, may require signifi-

cant computational resources. Overcoming this challenge involves developing efficient algorithms, leveraging hardware accelerators, and exploring novel architectures tailored to the computational constraints of MEMS navigation sensors [60].

### 5.2. Data Availability and Quality

AI-driven optimization relies heavily on the availability and quality of training data. However, acquiring labeled and diverse datasets for training and validation purposes can be challenging in the context of MEMS navigation sensors. Additionally, ensuring the quality and reliability of collected data, especially in dynamic and unpredictable environments, is crucial. Future research should focus on developing methodologies for collecting and annotating high-quality datasets that reflect a wide range of real-world scenarios and sensor variations, enabling robust AI-driven optimization [60].

### 5.3. Real-Time Processing Requirements

MEMS navigation sensors are often used in applications that require real-time or near real-time processing of navigation data. However, many AI algorithms, especially those involving complex deep learning models, can introduce latency and computational overhead, making real-time processing challenging. Future research should aim to develop lightweight AI models and algorithms specifically designed for real-time applications, balancing the trade-off between accuracy and computational efficiency [41; 61].

#### 5.4. Sensor Fusion and Integration

Integrating data from multiple sensors, also known as sensor fusion, is critical for optimizing MEMS navigation sensors. However, achieving seamless integration and synchronization of sensor data from different modalities can be challenging due to variations in data formats, sampling rates, and sensor characteristics. Future research should focus on developing standardized sensor fusion frameworks and techniques that can handle different types of sensors and facilitate efficient integration for improved accuracy and reliability [62].

#### 5.5. Context Awareness and Adaptability

MEMS navigation sensors operate in diverse and dynamic environments where conditions can change rapidly. To enhance user experiences, AI-driven optimization should aim to make sensors context-aware and adaptable. This involves developing algorithms that can dynamically adjust sensor parameters, optimize sensor configurations based on environmental conditions, and adapt to user-specific preferences. Future research should explore techniques such as reinforcement learning and adaptive control to enable MEMS navigation sensors to continuously improve performance based on evolving contexts [62].

#### 5.6. Interdisciplinary Collaboration

AI-driven optimization of MEMS navigation sensors requires interdisciplinary collaboration between experts in AI, MEMS technology, signal processing, and navigation systems. Collaboration and knowledge exchange between these domains are essential for developing comprehensive solutions that address the challenges faced by MEMS navigation sensors. Future research should encourage cross-disciplinary collaboration, fostering a deeper understanding of the unique requirements and opportunities for AI-driven optimization in MEMS navigation sensors [29; 64; 65].

### Conclusion

In conclusion, this review has demonstrated the significant role of AI in optimizing MEMS navigation sensors to enhance the user experience.

Through the integration of AI techniques such as sensor fusion, adaptive filtering, calibration,

compensation, and predictive modeling, MEMS navigation sensors can achieve improved accuracy, reduced power consumption, and enhanced reliability.

Case studies and research findings have showcased the successful implementation of AI-driven optimization in various applications, including autonomous vehicles, indoor localization, wearable devices, and unmanned systems. These applications have witnessed notable enhancements in accuracy, user satisfaction, and overall performance.

While challenges such as computational complexity, data availability, and real-time processing requirements exist, future directions in the field should focus on exploring novel AI techniques, integrating with emerging technologies, considering human-centric design principles, and establishing standards and benchmarks for evaluation. By continuing research and development efforts, the full potential of AI-driven optimization in MEMS navigation sensors can be realized, leading to advanced and user-friendly navigation systems that empower users in diverse domains.

### References

1. Le MQ, Capsal JF, Lallart M, Hebrard Y, Ham AVD, Reffe N, Geynet L, Cottinet P-J. Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015;79:147–157. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.10.001>
2. Kraft M, White Neil M. *MEMS for Automotive and Aerospace Applications*. Woodhead Publishing Limited; 2013. eBook ISBN: 9780857096487
3. Marope T. *Future Technological Factors Affecting Unmanned Aircraft Systems (UAS): A South African Perspective Towards 2025*. PhD. Dissertation, Nelson Mandela Metropolitan University, 2014.
4. Benser ET, Shkel AM. Trends in Inertial Sensors and Applications. *2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL) Proceedings*, Hapuna Beach, HI, USA, 2015. <https://doi.org/10.1109/ISISS.2015.7102358>
5. Al Bitar N, Gavrilov A, Khalaf W. Artificial Intelligence Based Methods for Accuracy Improvement of Integrated Navigation Systems During GNSS Signal Outages: An Analytical Overview. *Gyroscopy Navigation*. 2020;11(1):41–58. <https://doi.org/10.1134/S2075108720010022>
6. Mahdi AE, Azouz A, Abdalla AE, Abosekeen A. A Machine Learning Approach for an Improved Inertial Navigation System Solution. *Sensors*. 2022;22(4). <https://doi.org/10.3390/s22041687>

7. Wang C, Cui Y, Liu Y, Li K, Shen C. High-G MEMS Accelerometer Calibration Denoising Method Based on EMD and Time-Frequency Peak Filtering. *Micromachines (Basel)*. 2023;14(5):970. <https://doi.org/10.3390/mi14050970>
8. Noureldin A, El-Shafie A, Reda Taha M. Optimizing neuro-fuzzy modules for data fusion of vehicular navigation systems using temporal cross-validation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2007;20(1):49–61. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.03.002>
9. Biswas A, Wang HC. Autonomous Vehicles Enabled by the Integration of IoT, Edge Intelligence, 5G, and Blockchain. *Sensors*. 2023;23(4). <https://doi.org/10.3390/s23041963>
10. Li Duan F. *When AIAA Meets IEEE Intelligent Aero-Engine and Electric Aircraft*. Springer; 2023. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-8394-8>
11. Zhuang Y, Sun X, Li Y et al. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*. 2023;95:62–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>
12. Quinchia AG, Falco G, Falletti E, Dovis F, Ferrer C. A comparison between different error modeling of MEMS applied to GPS/INS integrated systems. *Sensors*. 2013;13(8):9549–9588. <https://doi.org/10.3390/s130809549>
13. Nabavi S, Zhang L. MEMS Piezoelectric Energy Harvester Design and Optimization Based on Genetic Algorithm; 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS): 18–21 Sept. 2016. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*. Published online 2016. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2016.7728786>
14. Xi F, Pang Y, Liu G et al. Self-powered intelligent buoy system by water wave energy for sustainable and autonomous wireless sensing and data transmission. *Nano Energy*. 2019;61:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.04.026>
15. Hajare R, Reddy V, Srikanth R. MEMS based sensors — A comprehensive review of commonly used fabrication techniques. In: *Elsevier-Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd; 2021;49:720–730. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.223>
16. Shi LF, Zhao Y Le, Liu GX, Chen S, Wang Y, Shi YF. A Robust Pedestrian Dead Reckoning System Using Low-Cost Magnetic and Inertial Sensors. *IEEE Trans Instrum Meas*. 2019;68(8):2996–3003. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2869262>
17. Goebel R, Tanaka Y, Wahlster W. *Autonomous and Intelligent Systems*. Vol 283. (Kamel M, Karray F, Hagrais H, eds.). Springer Berlin Heidelberg; 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31368-4>
18. Fontanella R, Accardo D, Caricati E, Cimmino S, Simone D De. An Extensive Analysis for the Use of Back Propagation Neural Networks to Perform the Calibration of MEMS Gyro Bias Thermal Drift. *IEEE*. Published online 2016:1–9.
19. Chimeh HE, Nabavi S, Janaideh MAI, Zhang L. Deep-Learning-Based Optimization for a Low-Frequency Piezoelectric MEMS Energy Harvester. *IEEE Sens J*. 2021;21(19):21330–21341. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3102537>
20. Fitzgerald AM, Fitzgerald AM. MEMS Inertial Sensors. In: Morton Y TJ, Frank van Diggelen, Spilker JJ, Parkinson BW, eds. *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Vol. 2. 1st ed. John Wiley & Sons; 2021:1435–1446.
21. Park M. *Error Analysis and Stochastic Modeling of MEMS Based Inertial Sensors for Land Vehicle Navigation Applications*. Master thesis. University of Calgary; 2004.
22. García JA, Lara E, Aguilar L. A low-cost calibration method for low-cost MEMS accelerometers based on 3D printing. *MDPI-Sensors*. 2020;20(22):1–19. [m10.3390/s20226454](https://doi.org/10.3390/s20226454)
23. Han S, Meng Z, Omisore O, Akinyemi T, Yan Y. Random error reduction algorithms for MEMS inertial sensor accuracy improvement — a review. *Micromachines (Basel)*. 2020;11(11):1–36. <https://doi.org/10.3390/mi1111021>
24. Fontanella R, Accardo D, Lo Moriello RS, Angrisani L, De Simone D. MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks. *Sens Actuators A Phys*. 2018;279:553–565. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.008>
25. Hua Y, Wang S, Li B, Bai G, Zhang P. Dynamic modeling and anti-disturbing control of an electromagnetic mems torsional micromirror considering external vibrations in vehicular lidar. *Micromachines (Basel)*. 2021;12(1):1–16. <https://doi.org/10.3390/mi12010069>
26. Jamil F, Iqbal N, Ahmad S, Kim DH. Toward accurate position estimation using learning to prediction algorithm in indoor navigation. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(16):1–27. <https://doi.org/10.3390/s20164410>
27. Couchot JF, Deschinkel K, Salomon M. Active MEMS-based flow control using artificial neural network. *Mechatronics*. 2013;23(7):898–905. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.02.010>
28. Berndt JO, Petta P, Unland R. *Proceedings Multiagent System Technologies*. (Goebel R, Tanaka Y, Wahlster W, eds.). Springer; 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64798-2>
29. Podder I, Fischl T, Bub U. Artificial Intelligence Applications for MEMS-Based Sensors and Manufacturing Process Optimization. *Telecom*. 2023;4(1):165–197. [m10.3390/telecom4010011](https://doi.org/10.3390/telecom4010011)
30. Algamili AS, Khir MHM, Dennis JO et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research*



Letters. 2021;16(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>

31. Shen C, Zhang Y, Guo X et al. Seamless GPS/Inertial Navigation System Based on Self-Learning Square-Root Cubature Kalman Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021;68(1):499–508. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2967671>

32. Scrivener M, Carmical P. *Recommender System with Machine Learning and Artificial Intelligence*. (Mohanty SN, Chatterjee JM, Jain S, Elngar AA, Gupta P, eds.). Wiley; 2020.

33. Abdolkarimi ES, Abaei G, Mosavi MR. A wavelet-extreme learning machine for low-cost INS/GPS navigation system in high-speed applications. *GPS Solutions*. 2018;22(1). <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0682-x>

34. Chen F, Chang H, Yuan W, Wilcock R, Kraft M. Parameter optimization for a high-order band-pass continuous-time sigma-delta modulator MEMS gyroscope using a genetic algorithm approach. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2012;22(10). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/10/105006>

35. Liang S, Zhu W, Zhao F, Wang C. High-efficiency wavelet compressive fusion for improving MEMS array performance. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(6). <https://doi.org/10.3390/s20061662>

36. Caruso D. *Improving Visual-Inertial Navigation Using Stationary Environmental Magnetic Disturbances*. Doctoral thesis. Paris-Saclay University; 2018. <https://theses.hal.science/tel-01886847>

37. Dong J, Zhuang D, Huang Y, Fu J. Advances in multi-sensor data fusion: Algorithms and applications. *Sensors*. 2009;9(10):7771–7784. <https://doi.org/10.3390/s91007771>

38. Mostafa MZ, Khater HA, Rizk MR, Bahasan AM. GPS/DVL/MEMS-INS smartphone sensors integrated method to enhance USV navigation system based on adaptive DSFCF. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2019;13(10):1616–1627. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0015>

39. Ma H, Mu X, He B. Adaptive navigation algorithm with deep learning for autonomous underwater vehicle. *Sensors*. 2021;21(19). <https://doi.org/10.3390/s21196406>

40. Xing H, Hou B, Lin Z, Guo M. Modeling and compensation of random drift of MEMS gyroscopes based on least squares support vector machine optimized by chaotic particle swarm optimization. *Sensors (Switzerland)*. 2017;17(10). <https://doi.org/10.3390/s17102335>

41. Huang L, Li H, Yu B et al. Combination of smartphone mems sensors and environmental prior information for pedestrian indoor positioning. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(8). <https://doi.org/10.3390/s20082263>

42. Šegviü M, Krajčbek K, Ivanjko E. Technologies for distributed flight control systems: A review. *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2015:1060–1065. <https://doi.org/10.1109/MIPRO.2015.7160432>

43. Nevlydov I, Filipenko O, Volkova M, Ponomaryova G. MEMS-Based Inertial Sensor Signals and Machine Learning Methods for Classifying Robot Motion. In: *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. Lviv, Ukraine, 2018:13–16. <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478613>

44. Fouché GJ, Malekian R. Drone as an autonomous aerial sensor system for motion planning. *Measurement (Lond)*. 2018;119:142–155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.027>

45. Jiang C, Chen S, Chen Y et al. A MEMS IMU de-noising method using long short-term memory recurrent neural networks (LSTM-RNN). *Sensors*. 2018;18(10). <https://doi.org/10.3390/s18103470>

46. Pokhrel N. *Drone Obstacle Avoidance and Navigation to Using Artificial Intelligence*. Master's Thesis. Aalto University; 2018.

47. Khan YA, Imaduddin S, Singh YP, Wajid M, Usman M, Abbas M. Artificial Intelligence Based Approach for Classification of Human Activities Using MEMS Sensors Data. *Sensors*. 2023;23(3):1275. <https://doi.org/10.3390/s23031275>

48. Cao Z, Hu L, Yi G, Wang Z. Arm Motion Capture and Recognition Algorithm Based on MEMS Sensor Networks and KPA. *IEEE*. 2021:133–139. <https://doi.org/10.1109/EIECS53707.2021.9588046>

49. Xing J, Wang X, Dong J. Big data tracking and automatic measurement technology for unmanned aerial vehicle trajectory based on MEMS sensor. *Springer*. 2022;26(9):4237–4247. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06457-y>

50. Bieliakov R. Simulation of platform-free inertial navigation system of unmanned aerial vehicles based on neural network algorithms. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021;1(2(57)):15–19. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225282>

51. Zahran S, Moussa A, El-Sheimy N, Sesay AB, Moussa A. Hybrid Machine Learning VDM for UAVs in GNSS-denied Environment. *Journal of the Institute of Navigation*. 2018;65(3):477–492. <https://doi.org/10.1002/navi.249>

52. Shi T, Wang H, Cui W, Ren L. Indoor space target searching based on EEG and EOG for UAV. *Soft Computing*. 2019;23(21):11199–11215. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3670-3>

53. Borup KT, Fossen TI, Johansen TA. A machine learning approach for estimating air data parameters of small fixed-wing UAVs using distributed pressure

sensors. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst.* 2020;56(3): 2157–2173. <https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2945383>

54. Colombo C, Scala F, Trisolini M, Gonzalo Gómez JL. The Environmental CubeSat Mission E.Cube for Low Earth Orbit Data Acquisition. *26th Conference of the Italian Association of Aeronautics and Astronautics (AIDAA 2021)*. 2021:1–6. <https://hdl.handle.net/11311/1186118>

55. Cong L, Yue S, Qin H, Li B, Yao J. Implementation of a MEMS-Based GNSS/INS Integrated Scheme Using Supported Vector Machine for Land Vehicle Navigation. *IEEE Sens J.* 2020;20(23):14423–14435. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3007892>

56. Silva MAC, Shan M, Cervone A, Gill E. Fuzzy control allocation of micro thrusters for space debris removal using CubeSats. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2019;81:145–156. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.02.008>

57. Yue S, Cong L, Qin H, Li B, Yao J. A Robust Fusion Methodology for MEMS-Based Land Vehicle Navigation in GNSS-Challenged Environments. *IEEE Access.* 2020;8:44087–44099. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977474>

58. Liddle JD, Holt AP, Jason SJ, O'Donnell KA, Stevens EJ. Space science with CubeSats and nanosatellites. *Nat Astron.* 2020;4(11):1026–1030. <https://doi.org/10.1038/S41550-020-01247-2>

59. Smith MW, Donner A, Knapp M et al. On-orbit results and lessons learned from the ASTERIA space telescope mission. In Proc. 32nd Annual AIAA/

USU Conference on Small Satellites SSC18-1-08. Logan, Utah, 2018.

60. Dai H-F, Bian H-W, Wang R-Y, Ma H. An INS/GNSS integrated navigation in GNSS denied environment using recurrent neural network. *Defence Technology.* 2020;16(2):334–340. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.08.011>

61. Nader Al Bitar, Gavrilo A, Khalaf W. Artificial Intelligence Based Methods for Accuracy Improvement of Integrated Navigation Systems During GNSS Signal Outages: An Analytical Overview. *Gyroscopy and Navigation.* 2020;11(1):41–58. <https://doi.org/10.1134/S2075108720010022>

62. Du S, Zhang S, Gan X. A Hybrid Fusion Strategy for the Land Vehicle Navigation Using MEMS INS, Odometer and GNSS. *IEEE Access.* 2020;8:152512–152522. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016004>

63. Mahdi AE, Azouz A, Abdalla AE, Abosekeen A. A Machine Learning Approach for an Improved Inertial Navigation System Solution. *MDPI Sensors.* 2022; 22(4). <https://doi.org/10.3390/s22041687>

64. Shit RC. Precise localization for achieving next-generation autonomous navigation: State-of-the-art, taxonomy and future prospects. *Computer Communications.* 2020;160:351–374. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.06.007>

65. Esashi M. MEMS development focusing on collaboration using common facilities: a retrospective view and future directions. *Microsyst Nanoeng.* 2021; 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00290-x>

## About the authors

**Ali Alizadeh**, M.S Student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; M.S Student of the Department of Space Engineering, Faculty of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran; ORCID: 0009-0006-0673-1893; E-mail: ali.rim.alizadeh@gmail.com

**Olga A. Saltykova**, Ph.D. of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Alireza B. Novinzadeh**, Ph.D. of Space Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Space Engineering, Faculty of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Daneshgah Boulevard, Ehsan Street Exit, East Zeynoddin Highway, Tehran, Iran; ORCID: 0000-0002-8123-6968; E-mail: novinzadeh@kntu.ac.ir

## Сведения об авторах

**Ализадех Али**, магистрант департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; магистрант кафедры космической инженерии, факультет аэрокосмической техники, Технологический университет К.Н. Туси, Тегеран, Иран; ORCID: 0009-0006-0673-1893; E-mail: ali.rim.alizadeh@gmail.com

**Салтыкова Ольга Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Новинзадех Алиреза Басохбат**, доктор наук в области космической инженерии, доцент, заведующий кафедрой космической инженерии, факультет аэрокосмической инженерии, Университет технологии имени К.Н. Туси, Тегеран, Иран; ORCID: 0000-0002-8123-6968; E-mail: novinzadeh@kntu.ac.ir



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330

EDN: RARIXZ

УДК 621.78

Научная статья / Research article

## Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов

Д.А. Разин<sup>a</sup> , И.С. Печников<sup>b</sup> , К.А. Фролов<sup>b</sup> , А.Б. Люхтер<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

✉ denisrazintv@gmail.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 16 апреля 2023 г.

Доработана: 14 июля 2023 г.

Принята к публикации: 18 июля 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Сложно представить современное машиностроение без своевременного и точечного совершенствования технологических процессов, в связи с чем появляются новые и улучшаются традиционные методы изготовления и обработки различного рода конструкций и деталей. Одним из путей снижения экономических затрат на механическую обработку зубчатых колес, изготовленных традиционными методами, является переход в область порошковой металлургии — порошковое спекание. Представлена возможность локального повышения механических свойств зубчатых колес, изготовленных методом порошкового спекания, с помощью лазерной обработки. Лазерная обработка проводилась на роботизированном комплексе сварки и термоупрочнения, который включает в себя 6-осевой промышленный робот, 2-осевой сварочный позиционер, лазерную головку и иттербиевый волоконный лазер мощностью 5 кВт. Высокая, относительно литых заготовок, пористость спеченного материала является фактором, ограничивающим возможность использования лазерного термоупрочнения, так как способствует повышению вероятности оплавления кромок обрабатываемых поверхностей. Настоящая работа направлена на решение данной проблемы. Перед проведением экспериментов были выделены основные критерии качества: «отсутствие оплавления» и «глубина упрочнения». В ходе проводимой серии экспериментов по лазерному термическому упрочнению удалось существенно повысить твердость образцов (в состоянии поставки около 30 HRC), которая после обработки находится в диапазоне от 55 до 65 HRC глубиной до 2800 мкм на зубьях шестерен, изготовленных из порошковых материалов. Однако остаются открытыми вопросы, находящие решение в проведении эксплуатационных испытаний, таких как долговечность и износ.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, лазерное термическое упрочнение, колесо зубчатое, закалка, металлографическое исследование

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

© Разин Д.А., Печников И.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б., 2023



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

#### Для цитирования

Разин Д.А., Печников И.С., Фролов К.А., Люхтер А.Б. Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 323–330. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330>

## Laser thermal hardening of gear wheels manufactured from powder materials

Denis A. Razin<sup>a</sup> , Iliya S. Pechnikov<sup>b</sup> , Kirill A. Frolov<sup>b</sup> , Alexander B. Lyukhter<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

✉ denisrazintv@gmail.com

#### Article history

Received: April 16, 2023

Revised: July 14, 2023

Accepted: July 18, 2023

#### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

#### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** It is difficult to imagine modern mechanical engineering without timely and targeted improvement of technological processes, in connection with which new and enhanced traditional methods of manufacturing and processing various types of structures and parts are being developed. One of the ways to reduce the economic costs of machining gears made by traditional methods is the transition to the field of powder metallurgy — powder sintering. This paper presents the possibility of a local increase in the mechanical properties of gears made by powder sintering using laser processing. Laser processing was carried out on a robotic welding and heat strengthening complex, which includes a 6-axis industrial robot, a 2-axis welding positioner, a laser head and a 5 kV ytterbium fiber laser. The high porosity of the sintered material compared to cast billets is a factor limiting the possibility of using laser thermal hardening, as it increases the likelihood of melting the edges of the machined surfaces. The present work is aimed at solving this problem. Before carrying out the experiments, the main quality criteria were identified: “no melting” and “hardening depth”. In the course of a series of experiments on laser thermal hardening, it was possible to significantly increase the hardness of the samples (in the delivered state about 30 HRC), which after processing is in the range from 55 to 65 HRC with a depth of up to 2800 μm on gear teeth made of powder materials. However, open questions remain, which are resolved in performance testing, such as durability and wear.

**Keywords:** powder metallurgy, laser thermal hardening, gear wheel, hardening, metallographic examination, hardness, microhardness

#### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2020-0015, state task of the VIGU).

#### For citation

Razin DA, Pechnikov IS, Frolov KA, Lyukhter AB. Laser thermal hardening of gear wheels manufactured from powder materials. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):323–330. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-323-330>

#### Введение

Работа по оптимизации технологических процессов не прекращается. Постоянно требуется улучшение существующих технологий [1; 2] и создаются новые с целью снижения финансовых и временных затрат на получение конечного продукта.

Процесс изготовления зубчатых колес традиционными методами являются весьма трудо-

затратными. Альтернативным вариантом получения заготовок для зубчатых колес является порошковая металлургия (ПМ).

ПМ обладает рядом преимуществ перед классическими способами получения заготовок зубчатых колес [3; 4]. Среди них следует выделить коэффициент использования сырья, близкий к единице, и значительное упрощение механической обработки заготовки либо полное избавление от данной операции.

Среди имеющихся разнообразных способов обработки металлов ПМ занимает свое особое место, так как позволяет не только производить изделия различных форм и назначений, но и создавать принципиально новые материалы, получить которые иным путем крайне трудно или вообще невозможно.

ПМ успешно конкурирует с литьем, обработкой давлением, резанием и другими методами получения изделий, дополняя или заменяя каждую из них. Являясь одной из молодых отраслей производства порошковая металлургия одновременно и есть древнейший способ получения изделий.

Процесс порошковой металлургии имеет много преимуществ по сравнению с другими технологиями формования металлов давлением, такими какковка, литье металла или механическая обработка.

Во-первых, ПМ выделяется своей экономической эффективностью [5], это выражается в значительном сокращении постпроизводственных процессов, что существенно снижает потери металла в производстве и, следовательно, снижает общие затраты. Кроме того, процесс имеет более низкое энергопотребление по сравнению с другими технологиями производства.

Во-вторых, ПМ позволяет обеспечить уникальность продукции благодаря высокой гибкости, то есть возможно адаптирование сплавов и физических характеристик в соответствии с требованиями. Производя детали с повторяемыми однородными структурами материала, процесс порошковой металлургии позволяет изготавливать конструкционные металлические компоненты с высокой точностью и согласованностью механического поведения для широкой области применения [5–7].

Порошковая металлургия используется для изготовления уникальных материалов с индивидуальными свойствами, которые невозможно достичь, используя классические способы плавления или формования изделий другими методами [8; 9]. Это позволяет получать композитные материалы из металлов, которые было бы невозможно смешивать иными методами, и обрабатывать материалы с высокой температурой плавления.

Важнейшим преимуществом порошковой металлургии является гибкость, которая включает в себя возможность контроля пористости,

регулирования параметров прочности, позволяет достичь в зависимости от функциональной особенности изделия желаемых изотропных и анизотропных свойств, также обладает уникальными магнитными свойствами и высокими значениями износостойкости, высокой повторяемостью и точностью при серийном производстве.

Методом порошковой металлургии возможно и изготовление колес зубчатой передачи, которые являются неотъемлемой частью огромного числа конструкций.

Основными проблемами изготовления зубчатых колес традиционными методами являются высокая стоимость и сложность их изготовления. В снижении стоимости изготовления способны помочь технологии порошковой металлургии.

Вдобавок дополнительным способом снижения экономических затрат на изготовление и замену вышедших из строя зубчатых колес является повышение износостойкости и, соответственно, долговечности их контактных поверхностей путем объемного либо локального упрочнения. В настоящее время известно множество методов упрочнения зубчатых колес, основными из которых являются закалка, улучшение, цементация, азотирование, нитроцементация, накатывание, электромеханическая обработка, цианирование, ультразвуковая обработка.

И хотя некоторые из перечисленных методов имеют достаточно хорошие показатели, общим недостатком каждого из них является образование на поверхности, вследствие термических или других видов воздействия, хаотичных, случайно расположенных микрорельефов, которые в процессе работы, особенно в период приработки, изнашиваются наиболее интенсивно, образуя абразивные частицы и снижая поверхностную прочность материалов.

Другим недостатком большинства методов упрочнения зубчатых колес является появление необходимости последующей (финишной) механической обработки ввиду температурных деформаций. Для зубчатых колес зачастую устанавливаются высокие качества точности, которые не позволяют применять изделия даже с незначительными деформациями. Необходимость проведения финишной обработки после операции упрочнения, помимо того, что это дополнительная операция, требует наличия специали-

зированной дорогостоящего инструмента, способного обрабатывать поверхности с твердостью 50 HRC и более.

Лазерное термоупрочнение (ЛТУ) [11], за счет локальности и времени нагрева, позволяет практически полностью избежать данных недостатков. Важно заметить, что зубчатые колеса после операции ЛТУ не нуждаются в дополнительной обработке, так как температурные деформации [12] от процесса ЛТУ находятся в диапазоне от 5 до 100 мкм.

К преимуществам технологии лазерного термического упрочнения также необходимо отнести низкое время обработки [13] (сам процесс обработки зуба длится несколько секунд, после чего происходит переход на другой зуб и при этом достигаются высокие значения твердости (более 50 HRC).

Лазерная закалка обеспечивает высокие скорости нагрева, которая сводит к минимуму риск деградации основного материала. Самозакалка основана на отводе тепла от поверхности в сердцевину детали путем теплопроводности вместо обычного охлаждения распылением воды [14].

Как и любая технология, лазерное термоупрочнение обладает рядом недостатков и ограничений, среди которых наиболее значимыми являются:

- высокие требования к качеству упрочняемой поверхности и к идентичности геометрических размеров изделий из одной партии;

- необходимость осуществлять подбор параметров упрочнения (скорость обработки, мощность лазерного излучения, размер пятна) для каждой позиции номенклатуры изделий, в зависимости от материала, размера зубьев и т.д. Необходимо заметить, что влияние данного фактора постоянно снижается за счет наработки базы данных режимов обработки конкретных материалов и сложных поверхностей.

Несмотря на эти недостатки, ЛТУ является одной из наиболее перспективных [15] технологий локального повышения механических свойств изделий.

Одним из недостатков изделий, изготовленных методами порошковой металлургии, является их высокая склонность к коррозии, обусловленная высокой пористостью после спекания. Микропоры в деталях, изготовленные методом порошковой металлургии, могут приводить

к ухудшению характеристик, вплоть до их полной непригодности в эксплуатации. Для уменьшения пор в деталях увеличивают их плотность, давление при прессовании, уменьшают размеры частиц порошка [16].

Образцы зубчатого колеса (рис. 1) изготовлены методом порошковой металлургии. Изделия, полученные из порошковых материалов, как правило, имеют микродефекты (несплошности, поры), что вызывает ряд нерешенных вопросов при обработке. Пористые материалы более склонны к оплавлению, чем изделия из металла, изготовленного по другим технологиям (литье, прокат). Это связано с тем, что наличие микродефектов в основном металле способно локально снизить теплопроводность, что приводит к местному перегреву и, соответственно, оплавлению.



**Рис. 1.** Внешний вид исследуемых зубчатых колес  
Источник: фото Д.А. Разина

**Figure 1.** The appearance of the investigated gears  
Source: photo by D.A. Razin

## 1. Методы исследования

Важнейшим критерием повторяемости результатов при лазерном термическом упрочнении является соответствие элементного состава обрабатываемого изделия, поэтому образцы предварительно прошли контроль химического состава с помощью лазерно-искрового эмиссионного спектрометра «Эланик».

Для упрочнения образцов был использован роботизированный комплекс сварки и термоупрочнения, включающий в себя 6-осевой промышленный робот компании Fanuc, лазерную головку, 2-осевой позиционер и иттербиевый волоконный лазер производства ООО НТО «ИРЭ-Полус» мощностью 5 кВт.

При проведении экспериментальных работ были выбраны два вида зубчатых колес, выпол-

ненных из порошкового материала: косозубое (рис. 1, а) и прямозубое (рис. 1, б).

Оценка наличия оплава поверхности зубчатых колес проводилась методом визуального контроля. Образцы, на поверхности которых были обнаружены следы оплава, не допускались к дальнейшему исследованию.

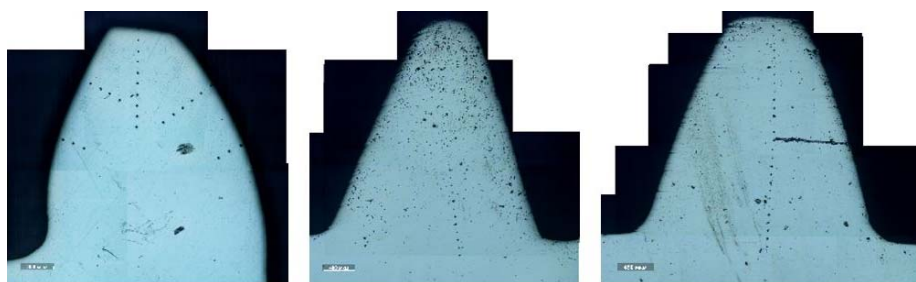
Критерием качества упрочнения были выбраны следующие показатели: отсутствие оплава кромок, глубина и твердость упрочненной зоны.

Глубина упрочнения оценивалась путем проведения металлографических исследований на микроскопе LEICA DM ILM, в ходе которых выбранное поперечное сечение образца проходило пробоподготовку, а затем осуществлялась

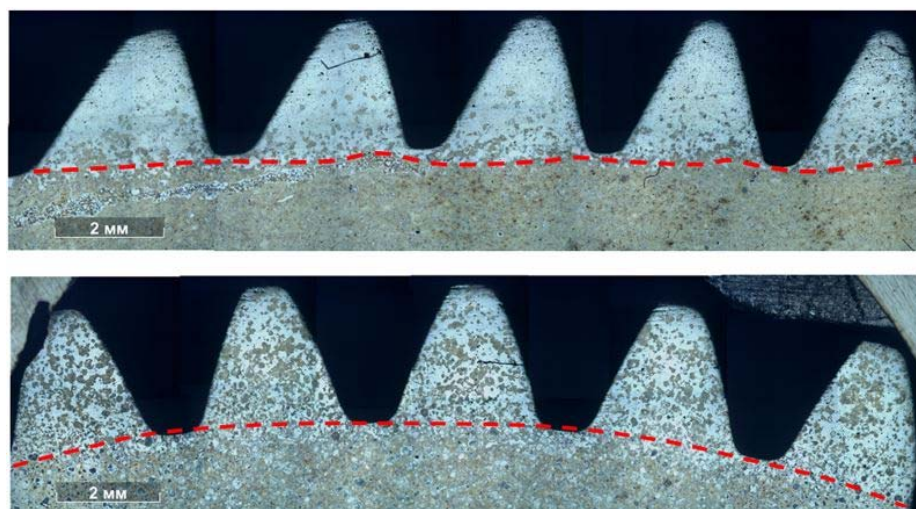
химическая обработка микрошлифа в четырехпроцентном нитале для выявления очертания зоны упрочнения. Замеры микротвердости проводились на ПМТ-3 на шлифе образца до осуществления химического вытравливания упрочненной зоны во избежание погрешности, вносимой раствором кислоты.

## 2. Результаты исследования

В ходе выполнения исследовательской работы была проведена серия экспериментов по лазерному термоупрочнению. В рамках проведенных экспериментов были отобраны наиболее приемлемые три режима обработки, которые удовлетворяли проведенному визуальному контролю (отсутствовало оплавление).



**Рис. 2.** Демонстрация зон замера микротвердости на образцах зубчатых колес  
Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова  
**Figure 2.** Demonstration of microhardness measurement zones on gear samples  
Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov



**Рис. 3.** Металлографические снимки образцов после травления, красной пунктирной линией выделена зона температурных структурных превращений  
Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова  
**Figure 3.** Metallographic images of samples after etching, the zone of temperature structural transformations is marked with a red dotted line  
Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov

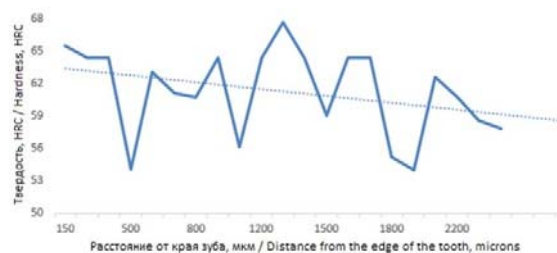
Замер микротвердости производили в нескольких направлениях с шагом в 100 мкм от края зуба. Для оценки глубины зоны упрочнения, от каждого замера микротвердости проводился перпендикуляр к плоскости, подверженной лазерному излучению. На рис. 2 указаны зоны замеры микротвердости образцов зубчатых колес после лазерного термоупрочнения, выполненных из порошкового материала.

На рис. 3 представлены металлографические снимки образцов после операции химического травления в 4 %-ном нитале, пунктирной линией выделена граница температурных структурных изменений.

Образцы в состоянии поставки имели значения твердости ниже 30 HRC. После лазерной обработки на поверхности значения твердости значительно возросли.

На исследуемых образцах зубчатых колес, изготовленных методом порошковой металлургии с обработкой в виде лазерного термоупрочнения, значение твердости упрочненного слоя лежит в диапазоне от 55 до 65 HRC на глубину до 2800 мкм (рис. 4).

На рис. 4 представлен усреднённый график распределения твердости на образцах зубчатых колес после упрочнения.



**Рис. 4.** График распределения микротвёрдости по глубине упрочненной зоны

Источники: общая разработка авторов статьи Д.А. Разина и К.А. Фролова

**Figure 4.** Graph of distribution of microhardness over the depth of the hardened zone

Source: general development of the authors of the article D.A. Razin and K.A. Frolov

Образцы зубчатых колес удалось упрочнить без значительного изменения геометрических параметров зубьев и, таким образом, удовлетворить требованиям визуально-измерительного контроля, при том, что модуль исследуемых зубьев составлял 1,25.

Далее упрочненные опытные образцы были направлены промышленному партнеру для про-

ведения эксплуатационных испытаний, таких как долговечность и износ.

## Заключение

Подводя итог выполненной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Порошковую металлургию можно считать практически безотходным производством, также она имеет ряд преимуществ, которые были описаны в работе, перед традиционными методами обработки зубчатых колес.

2. Предложенный в данной работе метод упрочнения зубчатых колес может быть применим и должен быть использован в определенных условиях.

3. Локальная закалка методом ЛТУ может повысить механические характеристики зубчатых колес. В работе показана возможность локального достижения твердости контактных поверхностей зубчатых колес, изготовленных из порошковых материалов до 55–65 HRC при изначальных значениях до 30 HRC в состоянии поставки.

4. Снижение пористости исходного порошкового материала позволило бы существенно расширить область технологических режимов, потенциально пригодных для обработки.

Настоящая работа доказывает возможность применения лазерного термоупрочнения в порошковой металлургии, а также указывает на возможные проблемы применения технологии лазерного термического упрочнения зубчатых колес, изготовленных методами порошковой металлургии.

## Список литературы

1. *Аборкин А.В., Бабин Д.М., Бокарев Д.В., Елкин А.И.* Влияние отжига на структуру и свойства алюмоматричных композитов, упрочненных WC1-x/УНТ структурами // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ — 2020)». Москва, 27–29 октября 2020 г. С. 3–6.

2. *Aborkin A., Khorkov K., Prusov E., Ob'edkov A., Kremlev K., Perezhogin I., Alymov M.* Effect of Increasing the Strength of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Microadditions of Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with TiC Nanoparticle // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9. Is. 11. Article 1596. <https://doi.org/10.3390/nano9111596>



3. Animesh B., Eisen W.B. Hot Consolidation of Powders & Particulates. Metal Powder Industries Federation, Princeton, USA, 2003. 254 p.

4. German R.M. (Ed.) Powder Metallurgy Science, 2nd ed.; Metal Powder Industries Federation: Princeton, NJ, USA, 1994. 472 p.

5. Hidalgo A.A., Frykholm R., Ebel T., Pyczak F. Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review // *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 19. Is. 6. Article 1600743. <https://doi.org/10.1002/adem.201600743>

6. Bolzoni L. Sintering of Titanium Alloys. Processing and Properties // *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022. Vol. 3. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00081-8>

7. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Gordo E. Understanding the properties of low-cost iron-containing powder metallurgy titanium alloys // *Materials and Design*. 2016. Vol. 110. P. 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.010>

8. Bocanegra-Bernal M.H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics // *Journal of materials science*. 2004. Vol. 39. No. 21. P. 6399–6420. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90>

9. Schatt W., Wieters K.-P. Powder metallurgy: processing and materials. European powder metallurgy association. EPMA Publ.; 1997.

10. Бжитских А.П. Повышение износостойкости зубчатой передачи привода буровой лебедки на основе регулярного микрорельефа поверхности зубьев // Сборник трудов конференции «Геология и нефтегазозносность западносибирского мегабассейна (опыт, инновации)» Тюмень, 10–11 декабря 2014 года. Изд-во: Тюменский индустриальный университет. 2014. С. 19–23.

11. Frerichs F., Lu Y., Lübben T., Radel T. Process Signature for Laser Hardening // *Metals*. 2021. No. 11. Article 465. <https://doi.org/10.3390/met11030465>

12. Zhang H., Shi Y., Xu C.Y., Kutsuna M. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing // *Surface Engineering*. 2003. Vol. 19. No. 2. P. 134–136. <https://doi.org/10.1179/026708403225002595>

13. Печников И.С., Завитков А.В., Фролов К.А. Применение лазерных технологий при термообработке зубчатого венца шестерни / Сборник трудов конференции «Наука и техника в дорожной отрасли». Москва, 18 марта 2021 года. М., 2021. Т. 4. С. 70–72.

14. Nemecek S., Muzik T., Misek M. Laser hardening of gear wheels // *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* // AIP Publishing. 2012. Article 411. <https://doi.org/10.2351/1.5062480>

15. Grezev N.V., Begunov I.A., Shamov E.M. Laser hardening of gear teeth using a powerful fibre laser // *Welding International*. 2016. Vol. 30. Is. 11875–879. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1154268>

16. Суслина С.В. Герметизация микропористости в деталях, изготовленных методом порошковой металлургии // *Современные проблемы науки и образования*. 2005. №. 1. С. 37–38.

17. Ye Y., Zhang Y., Huang T., Zou S., Dong Y., Ding H., Vasudevan V.K., Ye C. A Critical Review of Laser Shock Peening of Aircraft Engine Components // *Advanced Engineering Materials*. 2023. Article 2201451. <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>

## References

1. Aborkin AV, Babin DM, Bokarev DV, Elkin AI. Effect of annealing on the structure and properties of aluminum matrix composites hardened with WC1-x/CNT structures. *Vitality and Structural Materials Science (ZhivKoM — 2020): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference in a remote format*. Moscow, October 27–29. 2020:3–6. (In Russ.)

2. Aborkin A, Khorkov K, Prusov E, Ob'edkov A, Kremlev K, Perezhogin I, Alymov M. Effect of Increasing the Strength of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Microadditions of Multiwalled Carbon Nanotubes Coated with TiC Nanoparticle. *Nanomaterials*. 2019;9(11):1596. <https://doi.org/10.3390/nano9111596>

3. Animesh B, Eisen WB. *Hot Consolidation of Powders & Particulates*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, USA, 2003.

4. German RM. (Ed.) *Powder Metallurgy Science*. 2nd ed.; Metal Powder Industries Federation. Princeton, NJ, USA; 1994.

5. Hidalgo AA, Frykholm R, Ebel T, Pyczak F. Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2017;19(6):1600743. <https://doi.org/10.1002/adem.201600743>

6. Bolzoni L. Sintering of Titanium Alloys. Processing and Properties. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022;3:353–361. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00081-8>

7. Bolzoni L, Ruiz-Navas E.M., Gordo E. Understanding the properties of low-cost iron-containing powder metallurgy titanium alloys. *Materials and Design*. 2016;110:317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.010>

8. Bocanegra-Bernal MH. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of materials science*. 2004;39(21): 6399–6420. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90>

9. Schatt W, Wieters K.-P. *Powder metallurgy: processing and materials*. European powder metallurgy association. EPMA Publ.; 1997.

10. Bzhitskikh AP. Increasing the wear resistance of the gear drive of the drilling winch based on the

regular microrelief of the teeth surface. Proceedings of the conference “Geology and oil and gas potential of the West Siberian megabasin (experience, innovation)” Tyumen, December 10–11. Tyumen Industrial University Publ.; 2014. P. 19–23. (In Russ.)

11. Frerichs F, Lu Y, Lübben T, Radel T. Process Signature for Laser Hardening. *Metals*. 2021;11:465. <https://doi.org/10.3390/met11030465>

12. Zhang H, Shi Y, Xu CY, Kutsuna M. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing. *Surface Engineering*. 2003;19(2):134–136. <https://doi.org/10.1179/026708403225002595>

13. Pechnikov IS, Zavitkov AV, Frolov KA. Application of laser technologies in heat treatment of gear ring gear. *Proceedings of the conference “Science and technology in the road industry”*. Moscow, March 18. 2021;4:70–72. (In Russ.)

14. Nemecek S, Muzik T, Misek M. Laser hardening of gear wheels. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. AIP Publ.; 2012:411. <https://doi.org/10.2351/1.5062480>

15. Grezev NV, Begunov IA, Shamov EM. Laser hardening of gear teeth using a powerful fibre laser. *Welding International*. 2016;30(11):875–879. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1154268>

16. Suslina SV. Sealing microporosity in parts manufactured by powder metallurgy. *Modern problems of science and education*. 2005;1:37–38. (In Russ.)

17. Ye Y, Zhang Y, Huang T, Zou S, Dong Y, Ding H, Vasudevan VK, Ye C. A Critical Review of Laser Shock Peening of Aircraft Engine Components. *Advanced Engineering Materials*. 2023:2201451. <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>

### Сведения об авторах

**Разин Денис Андреевич**, аспирант кафедры физического материаловедения института новых материалов и нанотехнологий, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9506-2540; E-mail: denisrazintv@gmail.com

**Печников Илья Сергеевич**, аспирант кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Институт машиностроения и автомобильного транспорта, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0009-0003-6727-8525; E-mail: pechnikov@laser33.ru

**Фролов Кирилл Андреевич**, аспирант кафедры функционального анализа и его приложения, Институт прикладной математики, физики и информатики, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

**Люхтер Александр Борисович**, кандидат технических наук, советник при ректорате, директор Научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

### About the authors

**Denis A. Razin**, Postgraduate student of the Department of Physical Materials Science, Institute of New Materials and Nanotechnologies, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9506-2540; E-mail: denisrazintv@gmail.com

**Iliya S. Pechnikov**, Postgraduate student of the Department of Thermal Engines and Power Plants, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0009-0003-6727-8525; E-mail: pechnikov@laser33.ru

**Kirill A. Frolov**, Postgraduate student of the Department of Functional Analysis and Its Applications, Institute of Applied Mathematics, Physics and Informatics, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

**Alexander B. Lyukhter**, Candidate of Technical Sciences, Adviser to the Rector's Office, Director of the Scientific and Educational Center for the Implementation of Laser Technologies, Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru










DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339

УДК 535.2

EDN: IKZIWI

Научная статья / Research article


## Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов напряжения для формирования капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения

А.А. Самохвалов<sup>a,b</sup> , К.А. Сергушичев<sup>b</sup> , С.И. Елисеев<sup>b,c</sup> ,  
А.А. Смирнов<sup>c</sup>  , М.В. Тимшина<sup>c</sup> , Т.П. Бронзов<sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>b</sup> Лаборатория им. В.А. Бурцева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>c</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

 cmid@inbox.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 17 апреля 2023 г.

Доработана: 28 августа 2023 г.

Принята к публикации: 12 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Представлены результаты разработки высоковольтного полупроводникового генератора (на базе IGBT-транзисторов) напряжения с импульсным трансформатором и результаты экспериментов по генерации капиллярного разряда при помощи него на компактном газоразрядном источнике, способном формировать импульсы мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в области так называемого «водяного окна» — с длиной волны в диапазоне 2,4...4,4 нм. Описаны методы проектирования высоковольтного импульсного генератора импульсов напряжения: теоретические расчеты и результаты моделирования электрической принципиальной схемы в программном пакете LTSpice, описана разработанная конструкция импульсного трансформатора на основе кольцевых ферритов N 87 и самого генератора, представлены и проанализированы результаты его работы в составе компактного газоразрядного источника излучения. Показана перспективность использования подобного высоковольтного генератора (с полупроводниковыми транзисторными ключами) с импульсным трансформатором в составе источника мягкого рентгеновского излучения за счет его технико-эксплуатационных особенностей: разработанный генератор способен работать от сети переменного тока 380 В/50 Гц в частотно-пачечном режиме (с частотой следования формируемых импульсов напряжения до 600 Гц) и заряжать капиллярную емкость источника МРИ до напряжения более 20 кВ за время порядка 4 мкс, имеет небольшие габариты, не создает импульсных высокочастотных наводок и ложных срабатываний, а также обладает стабильными выходными (амплитудно-временными) параметрами.

**Ключевые слова:** мягкое рентгеновское излучение, капиллярная плазма, газоразрядный источник, высоковольтный генератор, трансформатор напряжения, емкостной накопитель, компьютерное моделирование, Altium Designer, Solid Works, LTSpice










### Финансирование

Исследование выполнено в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева» при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10110).

### Для цитирования

Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Елисеев С.И., Смирнов А.А., Тимшина М.В., Бронзов Т.П. Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов напряжения для формирования капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 331–339. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339>


## High-voltage semiconductor voltage pulse generator for capillary discharge formation in soft X-ray radiation source

Andrey A. Samokhvalov<sup>a,b</sup> , Kirill A. Sergushichev<sup>b</sup> , Stepan I. Eliseev<sup>b,c</sup> ,  
Artyom A. Smirnov<sup>b</sup>  , Maria V. Timshina<sup>b</sup> , Timur P. Bronzov<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
*Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>b</sup> «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, *Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>c</sup> St. Petersburg State University, *Saint-Petersburg, Russian Federation*

 [cmid@inbox.ru](mailto:cmid@inbox.ru)

### Article history

Received: April 17, 2023

Revised: August 28, 2023

Accepted: September 12, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The results of the development of a high-voltage semiconductor voltage generator (based on IGBT transistors) with a pulse transformer and the results of experiments on generating a capillary discharge using it on a compact gas-discharge source capable of generating pulses of soft X-ray radiation (SXR) in the area of the so-called «water window» — with wavelength in the range of 2.4...4.4 nm. Methods for designing a high-voltage pulse voltage pulse generator are described: theoretical calculations and results of modeling the electrical circuit diagram in the LTSpice software package, the developed design of a pulse transformer based on N87 ring ferrites and the generator itself is described, the results of its operation as part of a compact gas-discharge radiation source are presented and analyzed. The prospects of using such a high-voltage generator (with semiconductor transistor switches) with a pulse transformer as part of a soft X-ray radiation source are shown due to its technical and operational features: the developed generator is capable of operating from an alternating current network of 380 V/50 Hz in a frequency-burst mode (with a repetition rate of the generated voltage pulses up to 600 Hz) and charges the capillary capacitance of the SXR source to a voltage of more than 20 kV in a time of about 4  $\mu$ s, has small dimensions, does not create pulsed high-frequency interference and false alarms, and also has stable output (amplitude-temporary) parameters.

**Keywords:** Soft X-rays, capillary plasma, gas-discharge source, high-voltage generator, voltage transformer, capacitive storage, computer simulation, Altium Designer, SolidWorks, LTSpice

### Acknowledgements

The research was carried out at the V.A. Burtsev Laboratory LLC with the support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10110).

### For citation

Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Smirnov AA, Timshina MV, Bronzov TP. High-voltage semiconductor voltage pulse generator for capillary discharge formation in soft X-ray radiation source. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):331–339. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339>

## Введение

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) в «окне прозрачности воды» — диапазоне длин волн между линиями поглощения атомов кислорода (2,34 нм или 530 эВ) и углерода (4,40 нм или 280 эВ) — традиционно привлекало исследователей возможностью получения увеличенных изображений внутреннего строения различных биологических объектов [1]. Недавние демонстрации возможности мягкой рентгеновской микроскопии включают исследования инфицированных вирусом клеток [2]. Большой прогресс в развитии методов микроскопии «водяного окна» в значительной степени был достигнут с использованием синхротронного источника излучения [3]. Большая стоимость и сложность таких источников мотивировали на поиск более дешевых и компактных альтернатив, доступных значительному кругу исследователей, которые потенциально могут быть использованы для решения широкого спектра прикладных научных задач и исследований [4; 5]. Значительные усилия направлены на разработку газоразрядных источников мягкого рентгеновского излучения для микроскопии «водяного окна» [6; 7]. В таких системах применяются высоковольтные генераторы импульсов напряжения, которые при определенных условиях способны формировать электрические разряды в газе (обычно в азоте), создавая горячую кратковременную плазму, которая служит источником излучения. Используя оптическую фильтрацию, можно выделить определенные линии спектра и сфокусировать на исследуемом биологическом образце в диапазоне «водяного окна» [8].

В [9; 10] в экспериментах в составе компактного источника мягкого рентгеновского излучения для формирования электрических разрядов в газе был использован разработанный нами высоковольтный генератор на базе тиратрона ТПИ-10к/50 с ненакаливаемым катодом. Несмотря на ряд уникальных характеристик тиратрона (возможность работы в диапазоне напряжений 1–50 кВ и токов до 10 кА), у высоковольтного генератора на основе тиратрона есть ряд недостатков. Например, необходимость охлаждения тиратрона при его частотном режиме работы. При малых напряжениях достаточно охлаждения при помощи вентилятора,

однако при напряжениях, близких к максимальным рабочим — при помощи трансформаторного масла. Также необходима экранировка тиратрона и гальваническая развязка тиратронного генератора для исключения электромагнитных помех и наводок в другие электрические цепи, периодическая подстройка напряжения накала тиратрона, ограниченный ресурс (как почти у любого сильноточного газоразрядного прибора), а также необходимость использования высоковольтного мощного источника постоянного напряжения, который по сути определяет режим работы тиратронного генератора.

Альтернативой тиратронам могут быть твердотельные коммутаторы, например, такие, как сильноточные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и мощные полевые транзисторы (MOSFET). Благодаря последним достижениям в сильноточной высоковольтной полупроводниковой электронике появились транзисторы, способные коммутировать импульсные токи в сотни и тысячи ампер за время десятки и сотни наносекунд при максимальном рабочем напряжении в 2...4 кВ.

В данной работе представлены результаты проектирования и экспериментальной работы в составе источника МРИ-генератора высоковольтных импульсов напряжения на основе IGBT-транзисторов с импульсным трансформатором напряжений.

## 1. Результаты разработки IGBT-генератора

Как известно, для осуществления частотного или частотно-пачечного режима работы генератора тока, осуществляющего питание капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения, необходимо обеспечивать синхронную зарядку его реактивного накопительного элемента (емкости). В проектируемых для частотных лазеров мощных источниках на основе ВЧ-инверторов обычно предусмотрена возможность запрета заряда на период коммутации накопителя на нагрузку. Такие источники имеют сложную систему управления зарядом, поэтому, как правило, используется другой подход — метод импульсного резонансного заряда непосредственно от сетевого напряжения. Его применение целесообразно при умеренно небольших значениях энергии накопителя в импульсе и при достаточно широком

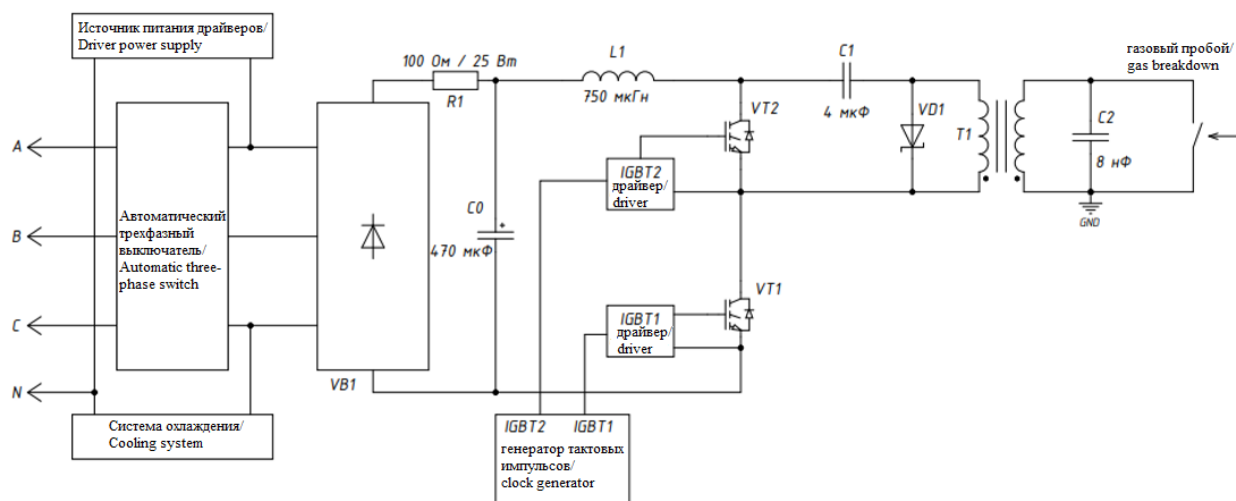
диапазоне следования рабочих импульсов во времени (от единиц герц до десятка килогерц в зависимости от энергии в импульсе).

Ниже на рис. 1 рассматривается один из возможных вариантов такой схемы заряда под конкретный тип накопителя, разработанный в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева». Основная идея состоит в том, чтобы заряжать емкостной накопитель генератора тока капиллярного разряда за один колебательный цикл при использовании промежуточного емкостного накопителя с той же энергетикой, но при более низком исходном напряжении, равном при-

мерно удвоенному выпрямленному напряжению трехфазной сети. Наиболее важным узлом данной системы заряда является импульсный трансформатор, во вторичной и первичной цепи которого используются емкости  $C1$  и  $C2$ , связанные приближенно условием

$$C1/C2 = L2/L1 = (N2/N1)^2 = n^2,$$

где  $L2$  и  $L1$  — собственные индуктивности вторичной и первичной обмоток соответственно,  $n$  — коэффициент трансформации напряжения (при числе витков в первичной и вторичной обмотках  $N1$ ,  $N2$  соответственно).



**Рис. 1.** Функциональная схема импульсной системы зарядки накопительной емкости на капиллярном узле

Источник: составлено автором К.А. Сергушичевым

**Figure 1.** Functional diagram of a pulse charging system storage tank on the capillary unit

Source: compiled by the author K.A. Sergushichev

Питание схемы осуществляется от трехфазной сети переменного тока 380 В/50 Гц. Трехфазный мостовой выпрямитель  $VB1$  (IXYS GUO40-12NO1) обеспечивает заряд емкости фильтра  $C0 = 470$  мкФ (2 последовательно и 2 параллельно соединенных электролитических конденсатора Epcos B43509A5477M000) до напряжения  $Ud \approx 530$  В. Для ограничения броска пускового тока используется демпфирующий резистор  $R1$ , далее подзарядка емкости фильтра в процессе эксплуатации осуществляется через систему предохранителей на случай разрушения электролитических конденсаторов при импульсной перегрузке по току.

Заряд промежуточного накопителя  $C1$  (4 параллельно соединенных конденсатора Epcos

B32026A3105M000) происходит при отпирании IGBT-транзистора  $VT1$  (IXYS IXYN30N170C) по внешней команде управляемого драйвера транзистора (Texas Instruments UCC23513). Ток заряда проходит по цепи: «ограничительный дроссель  $L1$  (разработан в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева»), промежуточный накопитель  $C1$ , диод  $VD1$  (3 последовательно соединенных диода GENESIC GB50MPS17), транзисторный ключ  $VT1$ ». По истечении времени  $T/2$  заканчивается первый полупериод зарядного тока, емкость  $C1$  будет заряжена до напряжения  $U1 \approx (Ud \cdot 2)/(1 + C1/C0)$ . Затем, в момент времени  $T/2$ , производится запуск транзистора  $VT2$  (2 параллельно соединенных транзистора IXYS IXGN200N170) внешним сигналом драйвера и

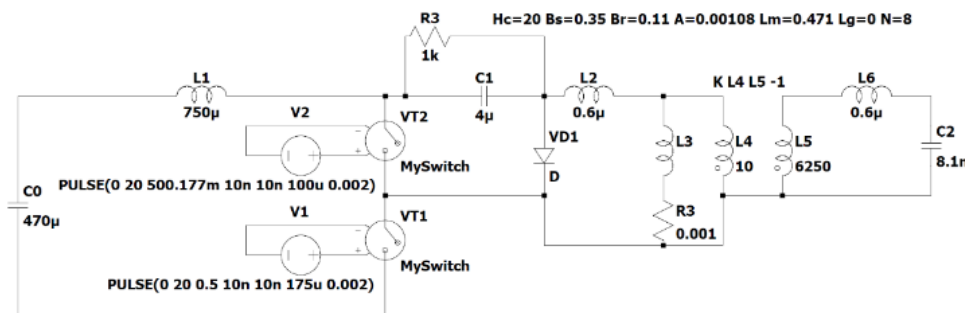
почти одновременно в момент времени  $T/2+\Delta$  происходит запираание транзистора VT1. Очень важно, чтобы запираание транзистора осуществлялось в момент перехода тока на транзисторе VT1 через нуль. При этом условии коммутационные потери в процессе запираания ключа будут минимальны, мало напряжение на нем и нагрев перехода.

## 2. Результаты численного моделирования IGBT-генератора

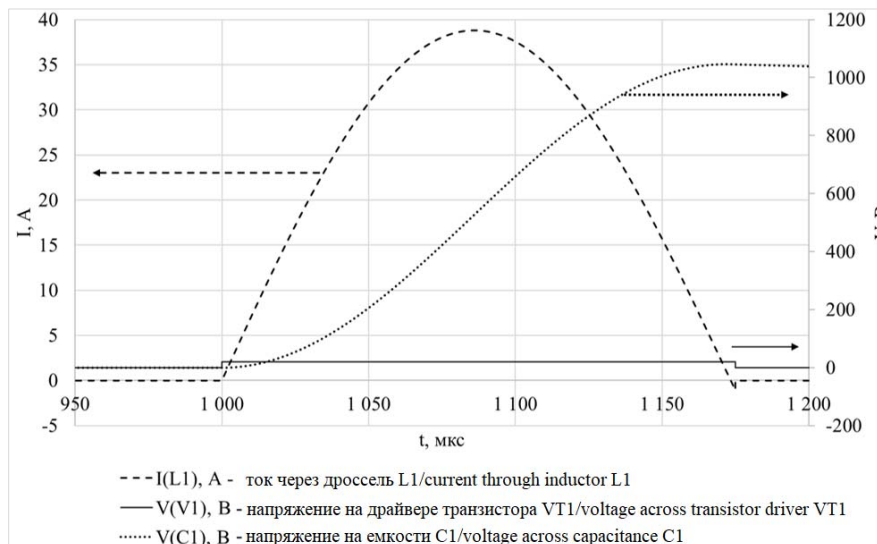
Моделирование схемы проводилось в программном пакете LTSpice. Расчетная схема представлена на рис. 2. Для упрощения все полупро-

водниковые элементы задавались без учета их паразитных параметров, а транзисторы представлялись в виде ключей, управляемых напряжением. На рис. 3 приведен результат моделирования заряда промежуточной емкости C1. Видно, что за счет величины индуктивности дросселя L1 (750 мкГн) время заряда составило примерно 170 мкс, при этом величина напряжения на емкости составила примерно удвоенное выпрямленное сетевое напряжение (1050 В).

Основной задачей являлось моделирование реального импульсного трансформатора, разработанного в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева». Его параметры представлены в табл. 1.



**Рис. 2.** Расчетная схема высоковольтного IGBT-генератора в LTSpice  
И с т о ч н и к : составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной  
**Figure 2.** Design diagram of a high-voltage IGBT-generator in LTSpice  
S o u r c e : made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina



**Рис. 3.** Заряд промежуточной емкости C1  
И с т о ч н и к : составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной  
**Figure 3.** Charge of intermediate capacitance C1  
S o u r c e : made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina

Таблица 1

## Параметры высоковольтного трансформатора

Параметр	Описание	Величина	Единица измерения
$D$	Внешний диаметр магнитопровода	0,19	м
$d$	Внутренний диаметр магнитопровода	0,11	м
$h$	Толщина магнитопровода	0,027	м
$A$	Сечение сердечника	0,00108	м <sup>2</sup>
—	Материал магнитопровода	1000 нм	—
$H_c$	Коэрцитивная сила	20	А/м
$B_s$	Индукция насыщения	0,35	Тл
$B_r$	Остаточная индукция	0,11	Тл
$M_1$	Количество витков в первичной обмотке	8	шт.
$M_2$	Количество витков во вторичной обмотке	180	шт.

Table 1

## Parameters of a high-voltage transformer

Parameter	Description	Value	Unit of measurement
$D$	External diameter of the magnetic circuit	0.19	m
$d$	The inner diameter of the magnetic circuit	0.11	m
$h$	Magnetic core thickness	0.027	m
$A$	Core cross section	0.00108	m <sup>2</sup>
—	Magnetic core material	1000 нм	—
$H_c$	Coercive force	20	A/m
$B_s$	Saturation induction	0.35	Tl
$B_r$	Residual induction	0.11	Tl
$M_1$	Number of turns in the primary winding	8	unit
$M_2$	Number of turns in the secondary winding	180	unit

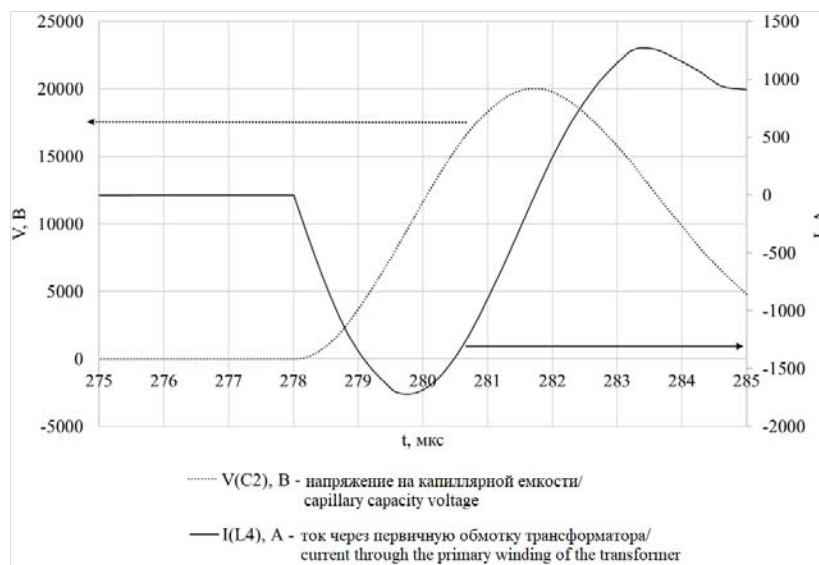


Рис. 4. Заряд капиллярной емкости C2

Источник: составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной

Figure 4. Charge of capillary capacity C2

Source: made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina



На основании измеренных параметров реального трансформатора, учтенных в расчетной модели, было проведено моделирование перезарядки емкости  $C1$  на капиллярную емкость  $C2$  величиной 8 нФ. На рис. 4 изображены две кривые. Видно, что при протекании тока через ноль напряжение на емкости  $C2$  достигает максимального значения 20 000 В. Расчетное время перезарядки составило примерно 4 мкс.

После проведения всех необходимых расчетов и компьютерного моделирования схемы

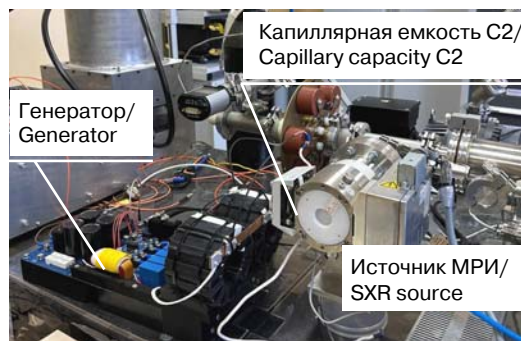
генератора была разработана окончательная схема электрическая принципиальная. Дальнейшая трассировка печатной платы высоковольтного генератора осуществлялась в E-CAD-MCAD пакете Altium Designer. После чего в программном пакете SolidWorks были спроектированы необходимые конструктивные элементы.

Фотография изготовленного генератора представлена на рис. 5. На рис. 6 представлен генератор в составе источника МРИ.



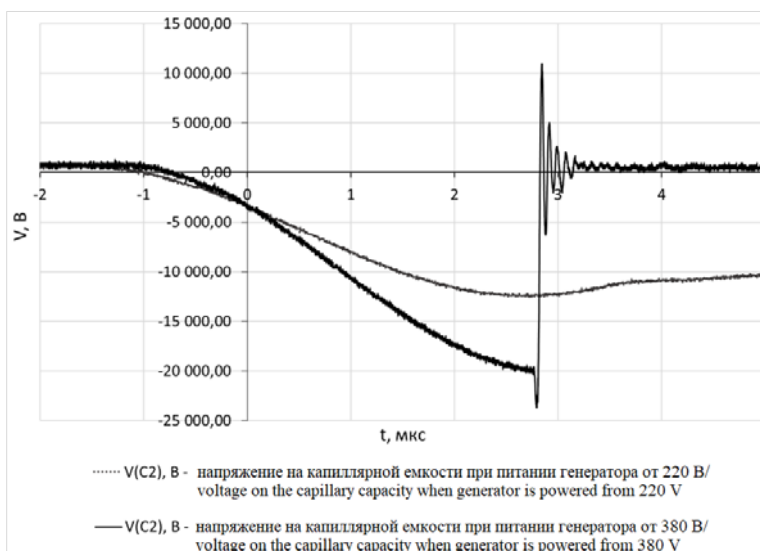
**Рис. 5.** Фотография разработанного высоковольтного генератора с импульсным трансформатором  
Источник: фото К.А. Сергушичева

**Figure 5.** Photo of the developed high-voltage generator with pulse transformer  
Source: photo by K.A. Sergushichev



**Рис. 6.** Фотография разработанного высоковольтного генератора в составе источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ)  
Источник: фото К.А. Сергушичева

**Figure 6.** Photo of the developed high-voltage generator as part of a soft X-ray radiation (SXR) source  
Source: photo by K.A. Sergushichev



**Рис. 7.** Экспериментальные данные по заряду капиллярной емкости  $C2$  при разных уровнях питающего напряжения

Источник: составлено авторами А.А. Смирновым, К.А. Сергушичевым

**Figure 7.** Experimental data on the charge of capillary capacity  $C2$  at different supply voltage levels  
Source: made by the authors A.A. Smirnov, K.A. Sergushichev

### 3. Испытания IGBT-генератора при работе в составе источника мягкого рентгеновского излучения

Испытания разработанного высоковольтного IGBT-генератора проводились при реальных условиях эксплуатации. С помощью форвакуумного и двух турбомолекулярных насосов была произведена откачка капиллярного узла до вакуума  $10^{-6}$  мбар, после чего в систему был напущен чистый рабочий газ азот. На первом этапе тестирование системы проводилось при работе от сетевого напряжения 220 В (рис. 7). Капиллярная емкость при таких условиях работы заряжалась до величины 12 000 В за время порядка 4 мкс. Как видно из рис. 7, этого уровня напряжений было недостаточно для пробоя газового промежутка. На следующем этапе генератор был подключен к трехфазной сети 380 В и были проведены аналогичные эксперименты. Капиллярная емкость при таких условиях заряжалась уже до 20 000 В за аналогичное время. И, как видно из рис. 7, данного уровня напряжений уже хватило для пробоя газового промежутка. На осциллограмме виден классический скол напряжения, после которого следует релаксационный колебательный процесс. Частота следования формируемых высоковольтных импульсов составляла 600 Гц

#### Заключение

Представлены результаты разработки (теоретические расчеты, компьютерное моделирование и проектирование, описание основных характеристик) высоковольтного полупроводникового генератора (на базе IGBT-транзисторов) напряжения с импульсным трансформатором и результаты экспериментов по генерации капиллярного разряда при помощи него в составе компактного газоразрядного источника мягкого рентгеновского излучения. Показано, что разработанный высоковольтный генератор способен работать от сети переменного тока 380 В/50 Гц в частотно-пачечном режиме (с частотой до 600 Гц), обладает малыми габаритами и имеет стабильные амплитудно-временные параметры формируемых высоковольтных импульсов напряжения.

#### Список литературы / References

1. Weinhardt V, Chen J, Ekman A, Mcdermott G, Le Gros M.A. Imaging cell morphology and physiology

using X-rays. *Biochemical Society Transactions*. 2019; 47(2):BST20180036. <https://doi.org/10.1042/BST20180036>

2. Loconte V, Chen J-H, Chen J-H, Cortese M, Ekman A, Le Gros MA, Larabell C, Barten-schlager R, Weinhardt V. Using soft X-ray tomography for rapid whole-cell quantitative imaging of SARS CoV-2-infected cells. *Cell Reports Methods*. 2021;1(7):100117. <https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2021.100117>

3. Jacobsen C, Kirz J. X-ray microscopy with synchrotron radiation. *Nature Structural Biology*. 1998; 5:650–653. <https://doi.org/10.1038/1341>

4. Adam J, Moy J, Susini J, Adam J, Moy J. Table-top water window transmission x-ray microscopy: Review of the key issues, and conceptual design of an instrument for biology. *Review of Scientific Instruments*. 2005;76:091301. <https://doi.org/10.1063/1.2018633>

5. Kördel M, Dehlinger A, Seim C, Vogt U, Fogelqvist E, Sellberg JA, Stiel H, Hertz HM. Laboratory water-window x-ray microscopy. *Optica*. 2020;7(6): 658–674. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.393014>

6. Benk M, Bergmann K, Schäfer D, Wilhein T. Compact soft x-ray microscope using a gas discharge light source. *Optics Letters*. 2008;33(20):2359–2361. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002359>

7. Nawaz MF, Nevkrla M, Jancarek A, Torrisi A, Parkman T, Turnova J, Stolcova L, Vrbova M, Limpouch J, Pina L, Wachulak P. Table-top water-window soft X-ray microscope using a Z-pinching capillary discharge source. *Journal of Instrumentation*. 2016; 11(07):P07002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/P07002>

8. Malyshev IV, Chkhalo NI. A method of z-tomography using high-aperture soft X-ray microscopy. *Ultramicroscopy*. 2019;202:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.04.001>

9. Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Bronkhov TP, Bolshakov EP. Optimization of parameters of a compact soft x-ray source for operation in the wavelength range 2-5 NM. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Journal of Technical Physics]*. 2022;92(8):1213–1218. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52786.73-22>

Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Елисеев С.И., Бронзов Т.П., Большаков Е.П. Оптимизация параметров компактного источника мягкого рентгеновского излучения для работы в диапазоне длин волн 2–5 нм // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 8. С. 1213–1218. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52786.73-22>

10. Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Smirnov AA, Bronzov TP, Getman DV, E.P. Bolshakov ER. Fast capillary discharge device for soft x-ray generation in the «carbon-window» and «water-window» spectral regions. *Journal of Instrumentation*. 2022;17(6):P06002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/06/P06002>

## Об авторах

**Самохвалов Андрей Александрович**, кандидат технических наук, ассистент лаборатории производственных лазерных технологий, Физико-технический мегафакультет, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация; старший научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4318-1991; E-mail: samokhvalov.itmo@gmail.com

**Сергушичев Кирилл Александрович**, инженер, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9379-2809; E-mail: k.a.sergishichev@gmail.com

**Елисеев Степан Иванович**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1140-3625; E-mail: step.eliseev@yandex.ru

**Смирнов Артем Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9341-674X; E-mail: cmid@inbox.ru

**Тимшина Мария Викторовна**, аспирант, научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3868-3797; E-mail: mariyitimshina@yandex.ru

**Бронзов Тимур Павлович**, инженер-исследователь, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0006-2987-9321; E-mail: imp\_impaler@mail.ru

## About the authors

**Andrey A. Samokhvalov**, Candidate of Technical Sciences, Assistant at the Laboratory of Industrial Laser Technologies, School of Physics and Engineering, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russian Federation; Senior Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4318-1991; E-mail: samokhvalov.itmo@gmail.com

**Artyom A. Smirnov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC., St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9341-674X; E-mail: cmid@inbox.ru

**Kirill A. Sergushichev**, Engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9379-2809; E-mail: k.a.sergishichev@gmail.com

**Stepan I. Eliseev**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior lecturer, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation; Research engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1140-3625; E-mail: step.eliseev@yandex.ru

**Maria V. Timshina**, Graduate student, Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3868-3797; E-mail: mariyitimshina@yandex.ru

**Timur P. Bronzov**, Research engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-2987-9321; E-mail: imp\_impaler@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-340-348

УДК 51-7


EDN: QUEGLB

Научная статья / Research article

## Гнездовидные плоские центральные конфигурации трапециевидной формы в классическом и обобщенном вариантах общей задачи $(4n+1)$ -тел

Ю.В. Перепелкина<sup>a</sup>  , А.Н. Задиранов<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН,  
Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация  
 amadecity@yandex.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 25 марта 2023 г.

Доработана: 17 июня 2023 г.

Принята к публикации: 22 июня 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Изучение центральных конфигураций, понятия и определения которых были сформулированы уже классиками небесной механики — Эйлером, Лагранжем, Лапласом и Лиувиллем в XVIII–XIX вв., представляет интерес не только для небесной механики, но и для многих разделов математического анализа, дифференциальных уравнений, аналитической механики, звездной динамики и динамики космического полета. В последние десятилетия наметились возможности использования понятия центральных конфигураций также в теоретической физике, химии, кристаллографии и др. Рассматриваются плоские центральные конфигурации, названные гнездовидными, состоящие из последовательно вложенных один в другой многоугольников, в вершинах которых находятся тела (материальные точки). Доказано существование гнездовидных плоских центральных конфигураций трапециевидной формы с шарообразным телом в центре. Ранее было установлено, что изолированные плоские трапециевидные центральные конфигурации существуют во вращающихся гелиоцентрических системах координат. Предполагается, что на систему действует только закон притяжения Ньютона. В качестве средства решения задачи применена система компьютерной математики Maple.

**Ключевые слова:** небесная механика, программный пакет Maple, гнездовидные конфигурации, трапециевидные конфигурации, сферические центральные тела

### Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 13-01-0059)

### Для цитирования

Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н. Гнездовидные плоские центральные конфигурации трапециевидной формы в классическом и обобщенном вариантах общей задачи  $(4n+1)$ -тел // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 340–348. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-340-348>

© Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н., 2023



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

## The nested planar central configurations of a trapezoid form in classical and generalized versions of the general $(4n+1)$ -body problem

Yulianna V. Perepelkina<sup>a</sup> , Alexander N. Zadiranov<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Russian Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation  
✉ amadeycity@yandex.com

### Article history

Received: March 25, 2023

Revised: June 17, 2023

Accepted: June 22, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The study of central configurations, whose concepts and definitions were already formulated by the classics of celestial mechanics — Euler, Lagrange, Laplace and Liouville in the XVIII–XIX centuries, is of interest not only for celestial mechanics, but also for many sections of mathematical analysis, differential equations, analytical mechanics, stellar dynamics and space flight dynamics. In recent decades, there have been opportunities to use the concept of central configurations also in theoretical physics, chemistry, crystallography, etc. We consider planar central configurations, called nested, consisting of polygons sequentially nested one into another, at the vertices of which there are bodies (material points). The existence of nested planar central configurations of trapezoidal type with a sphere in the centre is proved. Early, it was found that abovementioned isolated central configurations exist in the heliocentric rotated coordinate systems. It was supposed only the Newton's law of attraction is acting between bodies. The Maple software is used to derive the solution of this problem.

**Keywords:** celestial mechanics, Maple software, nested configurations, trapezoidal configurations, spherical central body

### Acknowledgements

The work is in part supported by the Russian Foundation of Basic Research (Grant 13-01-0059)

### For citation

Perepelkina YuV, Zadiranov AN. The nested planar central configurations of a trapezoid form in classical and generalized versions of the general  $(4n+1)$ -body problem. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):340–348. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-340-348>

### Введение

Продолжая развивать теорию центральных конфигураций (ЦК) небесных тел [1], основанную классиками небесной механики — Эйлером, Лагранжем, Лапласом и Лиувиллем в XVIII–XIX вв., на рубеже XIX–XX вв. было доказано существование плоских ЦК в задачах 4 и 5 тел [2–11]. Анализ предшествующих работ позволил А. Wintner (1941) сформулировать их строгие определения и теоремы существования [12]. Многочисленные ЦК в рамках задачи  $(n+1)$ -тел, относящиеся к трем последним десятилетиям, рассмотрены в работах [13–16], на основе которых были проведены дальнейшие исследования [17–21]. С появлением вычислительных программных пакетов были проведены расчеты для ЦК многих типов [22–24].

Среди множества исследованных видов ЦК встречаются так называемые «каскадные» или «гнездовидные» («nested», англ.) [25], состоящие

из последовательно вложенных один в другой многоугольников, в вершинах которых находятся тела. В упомянутых работах предполагалось, что входящие в ЦК тела имели сферическую структуру, т.е. являлись шарами и рассматривались как материальные точки с однородной структурой [26] (классические ЦК).

Целью данной работы является получение доказательства существования плоских гнездовидных ЦК трапециевидной формы в упомянутой задаче  $(4n+1)$ -тел при  $n = 2, 3, \dots, p$  как без центрального тела, так и с шаровым центральным телом (классические варианты) [27; 28]. Все численные результаты получены с помощью программного пакета Maple.

### 1. Общий вид уравнений движения тел. Стационарные решения

Уравнения пространственного движения тел  $P_k$  с массами  $m_{lk}$ ,  $l = 1, \dots, p$ ;  $k = 1, \dots,$

$n$  ( $l$  — число вложенных один в другой подобных многоугольников;  $k$  — число вершин многоугольников) в относительной гелиоцентрической системе координат  $P_{0xyz}$ , вращающейся с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг тела  $P_0$  с массой  $M$ , имеют вид [29]:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{lk} - 2\omega\dot{y}_{lk} - \omega^2 x_{lk} &= \\ &= -f(M + m_{lk}) \frac{x_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &+ f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{x_{lj} - x_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{x_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{x_{\sigma s} - x_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{x_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \\ \dots\dots\dots \\ \ddot{y}_{lk} + 2\omega\dot{x}_{lk} - \omega^2 y_{lk} &= \\ &= -f(M + m_{lk}) \frac{y_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &\pm f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{y_{lj} - y_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{y_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{y_{\sigma s} - y_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{y_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \\ \dots\dots\dots \\ \ddot{z}_{lk} &= -f(M + m_{lk}) \frac{z_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &+ f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{z_{lj} - z_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{z_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{z_{\sigma s} - z_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{z_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \end{aligned} \right\}$$

где  $r_{lk} = \sqrt{x_{lk}^2 + y_{lk}^2 + z_{lk}^2}$ ,  
 $\Delta_{ljk} = \sqrt{(x_{lj} - x_{lk})^2 + (y_{lj} - y_{lk})^2 + (z_{lj} - z_{lk})^2}$ .

При записи системы уравнений (1) предполагалось, что все тела  $P_0, P_k$  притягиваются по

закону Ньютона и взаимодействующие один с другим тела  $P_k$  не оказывают влияние на движение центрального тела  $P_0$  в виду  $m_{lk} \ll M$ , т.е. рассматривается планетный случай. Отметим также, что первая сумма в правой части системы уравнений (1) отражает гравитационное взаимодействие тела  $P_{lk}$  с телами внутри «первого» многоугольника ( $l = 1$ ), а вторая сумма учитывает гравитационное взаимодействие этого же тела  $P_k$  с телами, расположенными в вершинах «второго» ( $l = 2$ ) и последующих ( $l = 3, \dots, p$ ) многоугольников.

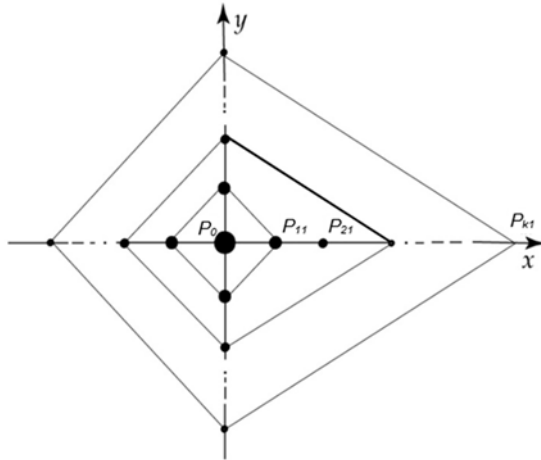
Рассмотрим стационарные решения системы уравнений (1)  $x_i = \bar{x}_i = \text{const}$ ,  $y_i = \bar{y}_i = \text{const}$ ,  $z_i = \bar{z}_i = \text{const}$ , определяющие центральную конфигурацию. Поскольку в этом случае имеет место  $\ddot{x}_i = \dot{x}_i = 0$ ,  $\ddot{y}_i = \dot{y}_i = 0$ ,  $\ddot{z}_i = \dot{z}_i = 0$ , необходимыми и достаточными условиями существования пространственных центральных конфигураций будут:

$$\left. \begin{aligned} \omega^2 x_{lk} &= f(M + m_{lk}) \frac{x_{lk}}{r_{lk}^3} - \\ &- f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{x_{lj} - x_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{x_{lj}}{r_{lj}^3} \right) - \\ &- f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{x_{\sigma s} - x_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{x_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \\ \dots\dots\dots \\ \omega^2 y_{lk} &= f(M + m_{lk}) \frac{y_{lk}}{r_{lk}^3} - \\ &- f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{y_{lj} - y_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{y_{lj}}{r_{lj}^3} \right) - \\ &- f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{y_{\sigma s} - y_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{y_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \\ \dots\dots\dots \\ 0 &= f(M + m_{lk}) \frac{z_{lk}}{r_{lk}^3} - \\ &- f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left( \frac{z_{lj} - z_{lk}}{\Delta_{ljk}^3} - \frac{z_{lj}}{r_{lj}^3} \right) - \\ &- f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left( \frac{z_{\sigma s} - z_{lk}}{\Delta_{\sigma slk}^3} - \frac{z_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Далее будут рассматриваться лишь плоские ЦК, поэтому последнее уравнение системы (2) исключается и имеет место  $r_{lk} = \sqrt{x_{lk}^2 + y_{lk}^2}$ ,  
 $\Delta_{ljk} = \sqrt{(x_{lj} - x_{lk})^2 + (y_{lj} - y_{lk})^2}$ .

## 2. Необходимые и достаточные условия существования в общем виде плоских гнездовидных трапецеобразных ЦК

Рассмотрим плоские ЦК в форме равнобедренных необязательно подобных трапеций (рис. 1) с взаимно перпендикулярными диагоналями и с центральным телом  $P_0$ .



**Рис. 1.** Гнездовидная плоская трапецеобразная центральная конфигурация с центральным телом  $P_0$   
Источники: составлено авторами

**Figure 1.** Nest-shaped flat trapezoidal central configuration with a central body  $P_0$   
Source: made by the authors

Запишем детальный общий вид относительно угловых скоростей вращения  $\omega_{lk}$  тел  $P_k$  необходимых и достаточных условий существования плоских ЦК последовательно для случаев одного многоугольника ( $l = 1$ ), затем двух вложенных один в другой многоугольников ( $l = 1, 2$ ), и, наконец,  $p$  ( $l = 1, 2, \dots, p$ ) вложенных один в другой многоугольников. Таким образом, будем иметь при  $l = 1; k = 1, \dots, 4$ :

$$\begin{aligned} \omega_{11}^2 x_{11} &= (M + m_{11}) \frac{x_{11}}{r_{11}^3} - \\ &\quad - m_{12} \left( \frac{x_{12} - x_{11}}{\Delta_{1211}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - \\ &\quad - m_{13} \left( \frac{x_{13} - x_{11}}{\Delta_{1311}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ &\quad - m_{14} \left( \frac{x_{14} - x_{11}}{\Delta_{1411}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - \\ &\quad \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{14}^2 x_{14} &= (M + m_{14}) \frac{x_{14}}{r_{14}^3} - \\ &\quad - m_{11} \left( \frac{x_{11} - x_{14}}{\Delta_{1114}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ &\quad - m_{12} \left( \frac{x_{12} - x_{14}}{\Delta_{1214}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - \\ &\quad - m_{13} \left( \frac{x_{13} - x_{14}}{\Delta_{1314}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

( $x \leftrightarrow y$ ).

При  $l = 1, 2; k = 1, \dots, 4$  к системе уравнений (3) добавятся:

$$\begin{aligned} \omega_{21}^2 x_{21} &= (M + m_{21}) \frac{x_{21}}{r_{21}^3} - \\ &\quad - m_{11} \left( \frac{x_{11} - x_{21}}{\Delta_{1121}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ &\quad - m_{12} \left( \frac{x_{12} - x_{21}}{\Delta_{1221}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - \\ &\quad - m_{13} \left( \frac{x_{13} - x_{21}}{\Delta_{1321}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ &\quad - m_{14} \left( \frac{x_{14} - x_{21}}{\Delta_{1421}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - \\ &\quad - m_{22} \left( \frac{x_{22} - x_{21}}{\Delta_{2221}^3} - \frac{x_{22}}{r_{22}^3} \right) - \\ &\quad - m_{23} \left( \frac{x_{23} - x_{21}}{\Delta_{2321}^3} - \frac{x_{23}}{r_{23}^3} \right) - \\ &\quad - m_{24} \left( \frac{x_{24} - x_{21}}{\Delta_{2421}^3} - \frac{x_{24}}{r_{24}^3} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичные системы уравнений имеют место и для случая  $l = 1, 2, \dots, (p - 1), p; k = 1, \dots, 4$ , и затем для переменных  $y$  ( $x \leftrightarrow y$ ). Для более удобной записи данные в соответствии с рис. 1 представлены в табл. 1.

Подставляя значения  $(x_{lk}, y_{lk}) \rightarrow (\alpha_{lk}, \beta_{lk})$ , приведенные в табл. 1, в системы уравнений (3)–(4), получаем «редуцированные» системы.

Таблица 1 / Table 1

**Фактические значения координат  $(x_{lk}, y_{lk})$  тел  $P_{kl}$**   
**Actual values of  $(x_{lk}, y_{lk})$  coordinates of  $P_{kl}$  bodies**

$l = 1$					$l = p - 1$				
$k$	1	2	3	4	$x_{(p-1)k}$	$\alpha_{(p-1)1}$	0	$-\alpha_{(p-1)3}$	0
$x_{1k}$	$\alpha_{11}$	0	$-\alpha_{13}$	0	$y_{(p-1)k}$	0	$\alpha_{(p-1)1}$	0	$\alpha_{(p-1)3}$
$y_{1k}$	0	$\alpha_{11}$	0	$-\alpha_{13}$	$r_{(p-1)k}$	$\alpha_{(p-1)1}$	$\alpha_{(p-1)1}$	$\alpha_{(p-1)3}$	$\alpha_{(p-1)3}$
$r_{1k}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{13}$	$l = p$				
$l = 2$									
$x_{2k}$	$\alpha_{21}$	0	$-\alpha_{23}$	0	$x_{pk}$	$\alpha_{p1}$	0	$-\alpha_{p3}$	0
$y_{2k}$	0	$\alpha_{21}$	0	$-\alpha_{23}$	$y_{pk}$	0	$\alpha_{p1}$	0	$-\alpha_{p3}$
$r_{lk}$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$\alpha_{23}$	$r_{lk}$	$\alpha_{p1}$	$\alpha_{p1}$	$\alpha_{p3}$	$\alpha_{p3}$

При  $l = 1; k = 1, \dots, 4$ , (конфигурация «трапеция + шар») имеет место

$$\omega_{11}^2 = \left[ M + \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{4} \right) m_{11} \right] \frac{1}{\alpha_{11}^3} + m_{13} \left[ \frac{1}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\alpha_{11}} \left( \frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{13})^2} - \frac{1}{\alpha_{13}^2} \right) \right],$$

$$\omega_{12}^2 = \omega_{11}^2$$

$$\omega_{13}^2 = \left[ M + \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{4} \right) m_{13} \right] \frac{1}{\alpha_{13}^3} + m_{11} \left[ \frac{1}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\alpha_{13}} \left( \frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{13})^2} - \frac{1}{\alpha_{11}^2} \right) \right],$$

$$\omega_{14}^2 = \omega_{13}^2$$

$$0 = -m_{11} \alpha_{11} \left( \frac{1}{\sqrt{2} \alpha_{11}^2} - \frac{1}{\alpha_{11}^3} \right) + m_{13} \alpha_{13} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_{13}^2 + \alpha_{11}^2}^3} - \frac{1}{\alpha_{13}^3} \right),$$

$$+ m_{13} \alpha_{13} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_{13}^2 + \alpha_{11}^2}^3} - \frac{1}{\alpha_{13}^3} \right), \quad (5)$$

$$0 = -m_{11} \alpha_{11} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_{11}^2 + \alpha_{13}^2}^3} - \frac{1}{\alpha_{11}^3} \right) + m_{13} \alpha_{13} \left( \frac{1}{\sqrt{2} \alpha_{13}^2} - \frac{1}{\alpha_{13}^3} \right).$$

Аналогичные системы уравнений имеют место и для случая при  $l = 1, 2; k = 1, \dots, 4$  (две трапеции + шар) и при  $l = 1, 2, \dots, (p - 1), p; k = 1, \dots, 4$  ( $p$  трапеций + шар).

Перейдем к доказательству существования решений приведенных иррациональных уравнений (1)–(5), подтверждающих существование гнездовидных ЦК (массы  $M, m_{lk}$  тел  $P_0, P_{lk}$  должны быть положительными). Поскольку рассматриваются конкретные формы ЦК, расстояния  $\alpha_{lk}$ , являются известными в некоторых диапазонах, и система (1)–(5) сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

В табл. 2 приведены совокупности параметров ЦК в абсолютной (инерциальной) системе координат. Для нахождения этих координат последнее условие в системе уравнений (5), не участвующее в нахождении геометрических и физических параметров ЦК, записывается в виде уравнений:



$$0 = -m_{11}(\alpha_{11} + x_G) \times \left( \frac{1}{\sqrt{2(\alpha_{11} + x_G)^2}^3} - \frac{1}{(\alpha_{11} + x_G)^3} \right) + m_{13}(\alpha_{13} + x_G) \times \left( \frac{1}{\sqrt{(\alpha_{13} + x_G)^2 + (\alpha_{11} - x_G)^2}^3} - \frac{1}{(\alpha_{13} + x_G)^3} \right). \quad (6)$$

Возьмем рассчитанную ранее таблицу геометрических и динамических параметров изоли-

рованной центральной конфигурации трапециевидного типа с шарообразным телом в центре [29], введя другие обозначения параметров в соответствии с обозначениями на рис. 1 (см. табл. 1), и получим расчеты для конфигурации из одной трапеции с шарообразным телом в центре и без него [30].

### 3. Численный анализ необходимых и достаточных условий существования плоских обобщенных гнездовидных трапециевидных ЦК: шарообразное тело в центре

Составим на основании табл. 2 расширенную таблицу параметров для состоящей уже из двух «кругов» плоской центральной конфигурации трапециевидного типа (табл. 3).

Таблица 2 / Table 2

Конфигурация «одна трапеция + шар» / «One trapezoid + sphere» configuration

M	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
0	2,0	1,2	2,30795	0,5	0,28058
0	3,0	1,2	14,6761	1	0,55280
0	5,0	3,0	4,61450	1	0,03592
1	2	1,2	4,39484	0,5	0,75879

M	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
5	2	1,2	15,0525	1	2,95208
10	2	0,5	388,770	1	65,2218
10	2	1,2	23,1832	0,5	5,06266
10	5	3	25,4909	1	0,34197

Таблица 3 / Table 3

Конфигурация (две трапеции + шар) / «Two trapezoids + sphere» configuration

M	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
0	2,0	1,2	2,30795	0,5	0,28058
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	4,0	2,4	18,1186	1,9343	0,28058
	4,8	3,0	30,285	6,2283	0,28058
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
1	2	1,2	4,3948	0,5	0,75879
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	3,2	1,92	36,176	2,7895	0,75879
	4,0	2,4	48,032	8,9805	0,75879
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
5	2	1,2	15,0525	1	2,9521
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	4,8	3,0	305,95	83,704	2,9521
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$

10	2	1,2	23,183	0,5	5,0626
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	3,0	1,8	239,70	29,691	5,0626
	4,0	3,0	328,79	152,03	5,0626
	4,8	3,0	522,43	148,69	5,0626
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
10	2	1,2	25,490	1	5,3432
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	4,0	2,4	335,37	74,332	5,3432
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
	2,5	1,25	47,834	1	4,6020
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
	4,75	2,5	509,42	74,788	4,6020
	$\alpha_{11}$	$\alpha_{13}$	$m_{11}$	$m_{13}$	$\omega_1^2$
	3,2	2	21,910	1	1,1622
	$\alpha_{21}$	$\alpha_{23}$	$m_{21}$	$m_{23}$	$\omega_2^2$
4,0	2,75	461,71	74,788	1,1622	

В приведенных системах уравнений (1) и условиях существования (3)–(5) ЦК тело  $P_0$  с массой  $M$  является шаровым, т.е. эти условия соответствуют классическим вариантам ЦК. Считая значения геометрических и физических параметров (расстояния и массы) трапециевидной ЦК с одним изолированным многоугольником заданными, будем искать трапециевидной ЦК с двумя включенными один в другой многоугольниками, формирующими «гнездовидную» ЦК. Для этой цели используем систему уравнений (6) и записываем 6 равенств  $\omega_{11}^2 - \omega_{13}^2 = 0$ ,  $\omega_{11}^2 - \omega_{21}^2 = 0, \dots, \omega_{22}^2 - \omega_{23}^2 = 0$  плюс рассматриваемое отдельно уравнение для квадрата общей угловой скорости вращения ЦК:

$$\begin{aligned} \omega^2 = \omega_{21}^2 = & (M + m_{21}) \frac{1}{\alpha_{21}^3} + \\ & + 2m_{22} \frac{1}{\sqrt{\alpha_{21}^2 + \beta_{22}^2}^3} + \\ & + \frac{m_{23}}{\alpha_{21}} \left( \frac{1}{(\alpha_{23} + \alpha_{21})^2} - \frac{1}{\alpha_{23}^2} \right) - \\ & + 2m_{12} \frac{1}{\sqrt{\alpha_{21}^2 + \beta_{12}^2}^3} \\ & + m_{11} \frac{1}{\alpha_{21}} \left( \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{21})^2} - \frac{1}{\alpha_{11}^2} \right) + \\ & + m_{13} \frac{1}{\alpha_{21}} \left( \frac{1}{(\alpha_{13} + \alpha_{21})^2} - \frac{1}{\alpha_{13}^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, имеем систему однородных линейных алгебраических уравнений относительно масс  $m_{ik}$  и  $M$  (размеры трапеций предполагаются заданными) вида

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 (a_{i1}m_{11} + a_{i2}m_{13} + \\ + a_{i3}m_{21} + a_{i4}m_{23} + a_{i5}M) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Матрица коэффициентов системы имеет размер  $6 \times 5$ , ранг матрицы равен 5. Общее число неизвестных системы равно 10:4 расстояния  $\alpha_{ik}$  (расстояния в многоугольнике равны попарно), 4 массы  $m_{ik}$  (массы равны попарно) и, наконец, центральная масса  $M$  и величина квадрата угловой скорости вращения  $\omega^2$ . Однако, поскольку массы  $m_{11}$ ,  $m_{12}$  и  $M$ , а также расстояния  $\alpha_{11} = \beta_{12} = \alpha$ ,  $\alpha_{13} = \beta_{14} = \beta$  первого многоугольника оказываются уже найденными (см. табл. 2), остается найти только  $\alpha_{21}$ ,  $\alpha_{23}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{23}$ ,  $\omega^2$ . Следующая фигура обладает размерами, превышающими размеры предыдущей, поэтому выбираем  $\alpha_{21} > \alpha_{11}$ ,  $\alpha_{23} > \alpha_{13}$  и неизвестными остаются лишь  $m_{21}$ ,  $m_{23}$ ,  $\omega^2$ .

### Заключение

Приведенные аналитические выкладки и численные результаты расчетов со всей очевидностью показывают, что для каждой изолированной ЦК трапециевидной формы с центральными телами в виде шара (табл. 2), найдется совокупность конечного числа охватывающих ее трапецеобразных ЦК (табл. 3).

При этом процедуры вычисления геометрических и физических параметров сначала изолированных (состоящих из одного многоугольника), а затем формирующих уже гнездовидные центральные конфигурации (состоящих из двух охватывающих один другого многоугольников) могут рассматриваться как Шаг 1 ( $n = 1$ ) и Шаг 2 ( $n = 2$ ) метода математической индукции доказательства существования таких ЦК. В рассматриваемом случае имеют место весьма объемные условия существования в виде (5)–(7), которые представляют определенную трудность для их проверки даже в частном случае. Однако анализ всех уже рассмотренных классических вариантов ЦК для различных форм конфигураций указывает на факт существования ненулевого дефекта у матриц анализируемых систем, и это гарантирует множество решений.

### Список литературы / References

1. Moeckel R. Central configurations. *Scholarpedia*. 2014;9(4):10667. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.10667>

2. Hoppe R. Erweiterung der bekanten Speciallosung des Dreikörper-problems. *Grünert Archiv der Mathematik und Physik*. 1879;64:218–223.
3. Lehmann-Filhés R. Über zwei Fälle des Vielkörper-problems. *Astronomische Nachrichten*. 1891;127(3033): 137–144.
4. Dziobek O. Über einen merkwürdigen Fall des Vielkörperproblems. *Astronomische Nachrichten*. 1900; 152(3627):33–46.
5. Andoyer H. Sur l'équilibre relatif de  $n$  corps. *Bulletin astronomique, Observatoire de Paris*. 1906;23: 50–59.
6. Andoyer H. Sur les solution periodique voisines des positions d'équilibre relatif, dans le problème des  $n$  corps. *Bulletin astronomique, Observatoire de Paris*. 1906;23:129–146. Available from: [https://www.persee.fr/doc/bastr\\_0572-7405\\_1906\\_num\\_23\\_1\\_12318](https://www.persee.fr/doc/bastr_0572-7405_1906_num_23_1_12318) (accessed: 12.09.2022)
7. Longley WR. Some particular solutions in the problem of  $n$  bodies. *Bull. of the American Mathematical Society*. 1907;13(7):324–335.
8. MacMillan WD, Bartky W. Permanent configurations in the problem of four bodies. *Transactions of the American Mathematical Society*. 1932;34(4):838–874.
9. Meyer G. Solutions voisines des solutions de Lagrange dans le problème des  $n$  corps. *Annales de l'Observatoire de Bordeaux*. 1933;17:77–252. Available from: **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** (accessed: 12.09.2022).
10. Williams WL. Permanent configurations in the problem of five bodies. *Transactions of the American Mathematical Society*. 1938;44(3):562–579. Available from: <https://www.jstor.org/stable/i308230> (accessed: 12.09. 2022).
11. Brumberg VA. Permanent configurations in the problem of four bodies and it's stability. *Astronomicheskij zhurnal [Astronomical zhurnal]*. 1957;4(1):55–74. (In Russ.)  
*Брумберг В.А.* Постоянные конфигурации в проблеме четырех тел и их устойчивость // *Астрономический журнал*. 1957. Т. 34. № 1. С. 55–74.
12. Wintner A. *The analytical foundations of celestial mechanics*. Princeton: Princeton University Press; 1941.
13. Elmabsout B. Sur l'existence de certaines configurations d'équilibre relatif dans le probleme des  $N$  corps. *Celestial Mechanics*. 1987;41:131–151. <https://doi.org/10.1007/BF01238758>
14. Elmabsout B. Nouvelles configurations d'équilibre relatif dans le problème des  $n$  corps. I. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris*. 1991;312 (2):467–472.
15. Grebenikov EA. The existence of the exact symmetric solutions in the plane Newton problem of many bodies. *Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling]*. 1988;10(8):74–80. (In Russ.)  
*Гребеников Е.А.* Существование точных симметричных решений в плоской ньютоновой проблеме многих тел // *Математическое моделирование*. 1988. Т. 10. № 8. С. 74–80.
16. Grebenikov EA. *Mathematical problems of homographic dynamic*. Moscow: MAX Press; 2010. (In Russ.)  
*Гребеников Е.А.* Математические проблемы гомографической динамики. М.: МАКС Пресс, 2010. 256 с.
17. Beltritti G, Mazzone F, Oviedo M. The Sitnikov problem for several primary bodies configurations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2018; 130:45. <https://doi.org/10.1007/s10569-018-9838-4>
18. Marchesin M, Vidal C. Spatial restricted rhomboidal five-body problem and horizontal stability of its periodic solutions. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2013;115(3):261–279. <https://doi.org/10.1007/s10569-012-9462-7>
19. Rivera A. Periodic solutions in the generalized Sitnikov  $(n+1)$ -body problem. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*. 2013;12(3):1515–1540. <https://doi.org/10.1137/12088387>
20. Kashif A, Shoaib M, Sivasankaran A. Central Configurations of an Isosceles Trapezoidal Five-Body Problem. In: Corbera M, Cors J, Llibre J, Korobeinikov A. (eds.) *Extended Abstracts Spring 2014. Trends in Mathematics* (vol. 4, p. 71–76). Birkhäuser, Cham; 2015. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22129-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22129-8_13)
21. Shoaib M, Kashif AR, Szücs-Csillik I. On the planar central configurations of rhomboidal and triangular four- and five-body problems // *Astrophysics and Space Science*. 2017;362:182. <https://doi.org/10.1007/s10509-017-3161-5>
22. Butikov E. *Motions of Celestial Bodies: Computer simulations*. Bristol, UK, IOP Publ.; 2014.
23. Llibre J, Moeckel R, Simó C. *Central Configurations, Periodic Orbits, and Hamiltonian Systems*. Advanced Courses in Mathematics — CRM Barcelona. Birkhäuser, Basel; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0933-7>
24. Doicu A, Zhao L, Doicu A. A stochastic optimization algorithm for analyzing planar central and balanced configurations in the  $n$ -body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2022;134:29. <https://doi.org/10.1007/s10569-022-10075-7>
25. Corbera M, Delgrano J, Lliobre J. On the Existence of Central Configurations of  $p$  Nested  $n$ -gons. *Qualitative Theory of Dynamical Systems*. 2009;8:255–265. <https://doi.org/10.1007/s12346-010-0004-y>
26. Hampton M. Planar  $N$ -body central configurations with a homogeneous potential. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2019;131:20. <https://doi.org/10.1007/s10569-019-9898-0>
27. Montaldi J. Existence of symmetric central configurations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2015;122:405–418. <https://doi.org/10.1007/s10569-015-9625-4>

28. Moczurad M, Zgliczyński P. Central configurations in planar  $n$ -body problem with equal masses for  $n = 5, 6, 7$ . *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2019;131:46. <https://doi.org/10.1007/s10569-019-9920-6>

29. Perepelkina YuV. An unified approach to the linear stability investigation of some classic and generalized planar central configurations of celestial mechanics. Part 2. Numeric investigations. *International Journal on Pure and Applied Mathematics, Classical and Celestial Mechanics, Cosmodynamics*. 2013;2(3):5–34. (In Russ.)

*Перепелкина Ю.В.* Унифицированный подход к исследованию линейной устойчивости некоторых классических и обобщенных плоских центральных конфигураций // *Международный журнал по теоретической и прикладной математике, классической и небесной механике и космодинамике*. 2013. Вып. 2(3). С. 5–34.

30. Fernandes AC, Mello LF. On Stacked Planar Central Configurations with Five Bodies when One Body is Removed. *Theory of Dynamical Systems*. 2013; 12:293–303. <https://doi.org/10.1007/s12346-012-0084-y>

### Сведения об авторах

**Перепелкина Юлианна Вячеславовна**, кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего отделом механики, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8115-8253; E-mail: amadeycity@yandex.ru

**Задиранов Александр Никитич**, доктор технических наук, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7787-8290; E-mail: zadiranov@mail.ru

### About the authors

**Yulianna V. Perepelkina**, Candidate of Phys.-Math. Sci., Deputy Head of the Mechanics Department, Russian Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8115-8253; E-mail: amadeycity@yandex.ru

**Alexander N. Zadiranov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Combustion Behavior and Environmental Safety Department, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7787-8290; E-mail: zadiranov@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-349-364  
UDC 519.1:519.681:519.683.8:519.685.1  
EDN: HBEUFG

Research article / Научная статья

## The synthesis of structural diagrams of automatic devices on formal neurons

Natalia L. Malinina

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

✉ malinina806@gmail.com

### Article history

Received: April 24, 2023  
Revised: August 20, 2023  
Accepted: September 22, 2023

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Abstract.** The development of finite state machines and the synthesis of neural networks come with enormous computational difficulties. The problems that are faced both by the creators of control finite state machines and the creators of neural networks are almost the same. In order for a control finite state machine to be implemented, an algorithm for its operation must be created, and then a program must be written, and finally this program must be implemented in hardware in the form of a finite state machine. It is crucial to create a finite state machine, which will be deterministic. As for neural networks, it is necessary either to set the weights on its edges with the help of experts, or it must be trained to obtain optimal weights on its edges. Both tasks, that is, the determination of finite state machines and the training of neural networks, are currently most often performed using approximate (exponential or genetic) algorithms. At the same time, few authors point out the fact that, firstly these algorithms give an error of up to 15 %, and secondly the operating time is quite long and requires large energy costs. The article has proven that control finite state machines and neural networks are equivalent based on their structure, which can be represented as a directed edge graph. Such equivalence makes it possible to use methods of normalizing arbitrary graphs to determine finite automata and synthesize neural networks. Methods of graph normalizing are extremely new, they are based on a fundamentally new approach of the extension of graph theory and will allow performing these operations using algorithms that have linear complexity or can significantly reduce the number of options when using brute force.

**Keywords:** finite machine, determination, neural network, directed graph, normal algorithm

### For citation

Malinina NL. The synthesis of structural diagrams of automatic devices on formal neurons. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):349–364. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-349-364>



## Синтез структурных схем автоматических устройств на формальных нейронах

Н.Л. Малинина 

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Российская Федерация  
✉ malinina806@gmail.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 24 апреля 2023 г.  
Доработана: 20 августа 2023 г.  
Принята к публикации: 22 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Разработку конечных автоматов и синтез нейросетей сопровождают огромные вычислительные трудности. Проблемы, с которыми сталкиваются как создатели управляющих конечных автоматов, так и создатели нейросетей, практически одинаковы. Для того чтобы управляющий конечный автомат мог быть реализован, надо сначала создать алгоритм его работы, потом написать программу, потом эту программу реализовать в «железе» в виде конечного автомата. Главное — надо создать, и это важно, детерминированный конечный автомат. Что касается нейросетей, то, чтобы она работала, необходимо либо задать с помощью экспертов веса на ее ребрах, либо ее надо обучить, чтобы получить оптимальные веса на ребрах. И то, и другое, то есть, детерминизация конечных автоматов и обучение нейронных сетей, в настоящее время производится чаще всего с помощью приближенных (экспоненциальных или генетических) алгоритмов. При этом часто авторы не указывают на тот факт, что, во-первых, эти алгоритмы дают ошибку до 15 %, а, во-вторых, время работы подобных алгоритмов достаточно велико, и требует больших энергетических затрат. В материале статьи доказывается, что управляющие конечные автоматы и нейросети — эквивалентны, если исходить из их структуры, которую можно представить в виде ориентированного реберного графа. Подобная эквивалентность позволяет применять для детерминизации конечных автоматов и синтеза нейросетей методы нормализации произвольных графов. Методы нормализации произвольных графов новые, они основаны на расширении теории графов и позволят применять алгоритмы линейной сложности или существенно уменьшать число вариантов при переборе.

**Ключевые слова:** конечный автомат, детерминизация, нейросеть, ориентированный граф, нормальный алгоритм

### Для цитирования

Малинина Н.Л. Синтез структурных схем автоматических устройств на формальных нейронах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 349–364. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-349-364>

### Introduction

A finite state machine (FSM) is an extremely simplified model of a computer, having a finite number of states and sacrificing all the features of computers, such as RAM, read-only memory, input-output devices and processor cores in exchange for ease of understanding, ease of reasoning and ease of software or hardware implementation. It can be said that FSM is an algorithmic component of a “data-

less” program that models “instinctive” behaviour that is not adaptable to the sequence of environmental influences. In other words, FSM are technologies designed to facilitate the development of other algorithms; they serve as a means of achieving the ultimate goal — the implementation of the algorithm. A neural network is a computational or logical circuit built from homogeneous processing elements, which are simplified functional models of neurons. The transfer functions of all neurons in a

neural network are fixed, and the weights are parameters of the neural network and can be changed. Neural networks are trained using genetic or other exponential algorithms.

Such algorithms take a long time to work, take up a lot of memory, and, moreover, are not absolutely accurate. Any neural network is a finite state machine and any finite state machine can be replaced by a suitable neural network [1]. The equivalence of the structures of finite state machines and neural networks makes it possible to solve the problems of their structural synthesis using the same methods. The problem of structural synthesis, both of a DFSM and a neural network, belongs to the area of *NP* — hard.

### **1. Finite State Machines: the basic concepts and problems**

Finite state machine (FSM) is a model of a computing device with a fixed and finite amount of memory. They read and process a chain of input symbols belonging to a finite set. Among the first researchers in the search of the simplest models of finite state machines were McCulloch and Walter Pitts, who proposed a concept similar to a finite state machine in 1943 [2].

An autonomous FSM, starting from a certain chart (diagram), can only generate a periodic sequence of  $x$  states. Such sequential execution of a given cycle of operations is typical for many areas of modern technology, therefore, the dynamic systems, which in an acceptable idealization can be considered as an autonomous FSM, are widely applied particularly for the implementation of an automaton approach to programming. The theory of formal languages [3–7] may be used for their design. And, finally, and most importantly, autonomous FSM are used in the synthesis of logic control algorithms [8–12].

The finite state machine transforms the input character sequences into the state or the output character sequences. Theoretically the deterministic state machine (DFSM) can be created from non-deterministic state machine (NFSM) according to reduction of DFSM to NFSM (Kleene's theorem [13]). Since the number of states (output symbols) is finite, the question is: what input sequences cause each of the possible states (or each of the output symbols) to occur? The answer was given by Kleene's theorems [13], which established that only

the events of the regular sets can be represented in a finite state machine. In this case, an algorithm for constructing any regular sets can be established.

However, in practice, determination is not always possible, since in the worst case the number of states in an equivalent DFSM grows exponentially with the increase in the number of states of the original NFSM. This situation becomes the main problem when creating algorithms for reducing the NFSM to the form of a DFSM.

So, the main problem arises: how to make a set regular? The set becomes regular if it can be ordered. And there is no efficient way to understand whether the set is regular or not. Limitations on the capabilities of computers (Gödel's theorem [14]) made it necessary to use technologies of genetic (evolutionary) or other exponential algorithms in order to create DFSM.

Thus, the finite state machines are classified as the deterministic (DFSM) and the non-deterministic (NFSM). The only and main difference between NFSM (non-regular set) and DFSM (regular set) is the existence of several transitions in one symbol from one state. A deterministic finite automaton is one in which, for any given sequence of input symbols, there is only one state to which the automaton can go from the current state.

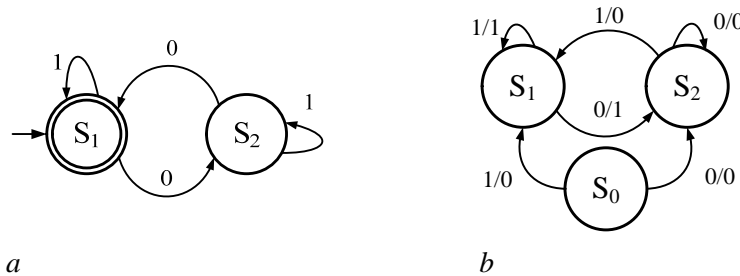
If the class of the dynamical systems can be extended in order to include infinite memory, then for the dynamical systems of this wider class (Turing machines) the answer to the question “what can they do?” is much simpler — they can implement any predefined algorithm. The concept of a Turing machine underlies the definition of the concept of an algorithm: an algorithm is any process that can be carried out on a finite state machine supplemented with the infinite memory, that is, algorithmically complete machines: on a Turing machine [15], on a Post machine [16], etc.

According to the above definition, deterministic finite automata are always complete — they define a transition for each state and for each input symbol. In addition, to ensure the uniqueness of the algorithms, the synthesised finite automata must be deterministic (ordered). When developing programs that are characterised by complicated control logic, one can use the automaton approach, which allows making the program text more regular and compact.

Finite state machines (FSM) can be represented as block diagrams; it is the traditional technology for algorithms. The most convenient form of their

representation for a person is a graphical one — a state-transition-diagram, and for programming and formal transformations — a tabular one. State diagrams provide a graphical way to model how a system responds to a disturbance, and is a graph. It specifies how the system can move from one state (vertex) to another one. A key characteristic of such

event-driven systems is that the behaviour of the system often depends not only on the last or current event, but also on the previous events, which is expressed using a state diagram. So, a state diagram for a finite state machine is an ordered graph in which the vertices denote states, and the arcs show transitions between two states (Figure 1).



**Figure 1.** The graphical representation of the finite state machines: *a* —  $S_1, S_2$  — states. The arcs are labeled by input data; *b* —  $S_0, S_1, S_2$  — states. The arcs are labeled as  $j/k$ , where  $j$  — input data,  $k$  — output data  
 Source: made by the author

In terms of graph theory, the problem of covering all transitions of the automaton is formulated as the task of graph traversal, that is, passing along a route containing all the arcs of the graph. There are two main problems associated with the graph traversal for the automaton state machine: non-determinism and too large size of the graph. A non-deterministic automaton is an automaton in which the transition function is ambiguous: one pair corresponds to several arcs in the graph. Since the choice of one or another of these arcs cannot be determined by the test action, it is impossible to guarantee the unambiguous traversal of the state graph during testing. Although it should be noted that the ambiguity of the exit function does not create additional problems. It is only required that some predicate from the state, input, and output symbols be satisfied. [12]. The evaluation of the DFSM generation algorithm is disappointing. The process of generating a DFSM is a *NP* — hard problem. But on the other hand, after the DFSM is generated, it processes any symbol in constant time and a string of length  $N$  in  $O(N)$  time.

An NFSM in a state-transition diagram can have two or more arcs as outputs from the same state labeled with the same input symbol. Such a NFSM does not have an adequate tabular (functional) representation, but can be transformed into a conventional DFSM. The lack of an internal

memory limits its ability to transform chains (simulation ability). Although in the general case such restrictions allow to solve many problems.

The are also controlling FSM. Their main difference from other types of FSMs (transformers and recognizers) is that they contain not separate input actions, but Boolean formulas from them [18–21] in the transition marks. However, the construction of control FSM is even more difficult, and in some cases, it is not possible to build such an automata at all.

The ordering of control FSMs using the exhaustive enumeration, even with small sizes of FSM, is extremely time-consuming, and their heuristic construction does not always give acceptable results, although sometimes this is the only way. The simulated annealing method does not provide a significant improvement [20]; ant algorithms are more suitable for problems where solution is to find paths in a graph. Therefore the most of the work in the field of software search engineering is based on the use of evolutionary algorithms [21]. One of the most important advantages of genetic (evolutionary) algorithms is the absence of the need for information about the behaviour of the function and the negligible impact of possible gaps on optimisation processes.

Genetic algorithms are also used to increase the efficiency of neural networks training. The explo-



sive growth of interest in artificial intelligence (AI) is mainly due to the growth of computing capabilities with its help, and not to the emergence of new algorithms.

The task of structural synthesis is to construct an automaton diagram of minimal complexity. It should be noted that the problem itself is *NP* — hard. Gödel’s theorems [14] are directly related to the limitation of the capabilities of computers, which also were recognized by Turing, Church, Nagel and others. Turing showed that the same restrictions apply to humans [15]. In this regard, neural network technologies began to be used to create FSM, that is, researchers began to create FSM, using neural networks or genetic (evolutionary) algorithms.

**2. Neural network. The basic concepts. Problems**

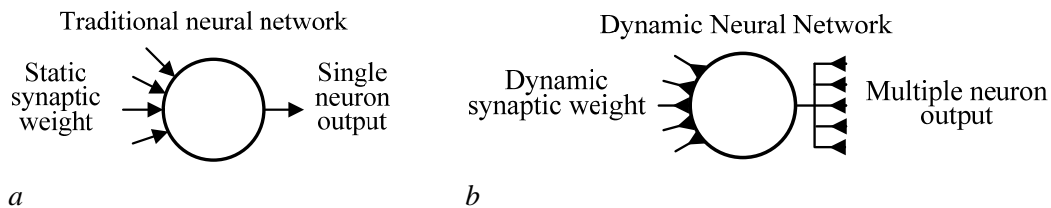
Recently, more and more people began to discuss neural networks, and great attention is being paid to the creation of artificial intelligence based on artificial neural networks. A lot of attention is being paid to this scientific area. Let us briefly review the principles that are embedded in automatic neural networks.

A biological neuron has processes of nerve fibers of two types: dendrites, through which impulses are received, and an axon (it is the only one), along which a neuron can transmit an impulse. The axon contacts the dendrites of other neurons through special formations — synapses, which affect the strength of the impulse. It can be assumed that during the passage of the synapse, the strength of the impulse changes a certain number of times, which is called the weight of the synapse. Impulses received by the neuron simultaneously through several dendrites are summed up. If the total impulse exceeds a certain threshold, the neuron is excited, generates its own impulse and transmits it further along the axon. It is important to note that

the weights of synapses can change over time, which means that the behaviour of the corresponding neuron also changes.

Neural networks are artificial, multilayer, highly parallel logical structures made up of formal neurons. The foundation of the theory of neural networks and neurocomputers was laid by the work of American neurophysiologists [2]. The book [22] had a significant influence on the further development of the neural network theory. The theory of neural networks continues to develop quite intensively at the beginning of the 21st century. Potential areas of application for artificial neural networks are those where human intelligence is inefficient and traditional computations are time-consuming or physically inadequate. The relevance of the use of neural networks increases many times when it becomes necessary to solve poorly formalized problems. The main areas of application of neural networks: automation of the classification process, forecasting, recognition process, decision-making process; management, coding and decoding of information; approximation of dependencies, etc. With the help of neural networks, an important task in the field of telecommunications is successfully solved — the design and optimisation of communication networks, as well as the tasks of designing new telecommunication networks.

Thus, the creation of automatic systems based on a neural network consists of choosing the network architecture and the selecting of the network weights. The selection of weights is the process of “training” the network. Neural networks turn out to be something between a central processing unit and a human brain. At this moment the selection of weights is carried out using either genetic algorithms or expert assessments. So, a neural network is a computational or logical chart built from homogeneous processor elements, which are the simplified functional models of neurons (Figure 2).



**Figure 2.** The graphical representations of the neural networks: *a* — Traditional neural network; *b* — Dynamic neural network

Source : made by the author

As a rule, the transfer functions of all neurons in a neural network are fixed, and the weights are the parameters of the neural network and can change. Some inputs of neurons are labeled as external inputs of the neural network, and some outputs are labeled as external outputs.

The work of the neural network is to transform the input signal into an output signal, and this transformation is determined by the weights of the neural network. A formal neuron in neural networks is a processor element, which is a data converter that receives input data and transforms it in accordance with a given function and parameters. A synapse in neural networks is a connection between formal neurons. The output signal from a neuron enters the synapse, which transmits it to another neuron. Complicated synapses can have memory. As a rule, there are quite a lot of synapses in a neural network. An adder in neural networks is a block that sums up the signals coming from neurons through synapses. In a general case, an adder can transform signals and transmit them to neurons or adders also through synapses.

### 3. Graphical representation of the main elements of a finite machine on formal neurons

Let the functions of the finite automaton be given. It is necessary to build its block diagram on formal neurons. Thus, it is necessary to show the connection between the structure of an ordinary network model and the structure of an automaton based on formal neurons (AFN). To solve this problem, an ordinary normal network models can be used [23], since they contain the vertices of only well-defined types. Structural-optimal network models are best suited since they do not have the simplest vertices in which no logical functions are implemented. It is known that the canonical edge graph has four types of vertices [23]. These four types of vertices are similar to the main types of structural formations of the nervous system of living beings, which includes:

- Receptors — nerve endings that transmit external excitations to the nervous system (cells that have only outputs);
- Neurons — are nerve cells with  $m_n \geq 1$  inputs (dendrites) and only one output (axon) (a formal neuron has the same structure [23]);
- Branching of axons that transmit nerve excitations to other neurons and tissues, that is, the

elements of the nervous system that have one input and  $m_a \geq 1$  outputs;

- Effectors (endings) that transmit nerve excitations to the working organs, that is, cells that have only inputs from the nervous system.

The obvious analogy between the structure of a canonical edge graph and that of a neural network, as well as between the structure of one of the types of vertices of a canonical edge graph and that of a formal neuron, leads to the reasonable assumption that canonical edge graphs can be used in order to:

- Formalise the synthesis of the structure of automatic devices and systems built on formal neurons;
- Formalise the synthesis of mathematical models that would enable studying individual functions of the nervous system of a living organism, implemented in accordance with a given logic and a set of external excitations.

The stated assumption is quite consistent with the theorem given in [24] that any finite automaton can be replaced by a suitable network of formal neurons.

The question arises: is it possible, using the principle of normalizing, to transform the diagram of a given finite machine into a network consisting of formal neurons? Using the example of normal algorithm synthesis [23], it was shown that operators can be represented as arcs of a canonical edge graph, connecting vertices of certain four types. Thus, it turns out that there is a similarity between the structure of the nervous system and the structure of normal algorithms. This similarity allows us to suggest that the basis of nervous activity, including higher, apparently, is a process similar to a normal algorithm, although, most likely, everything happens the other way around: normal algorithms intuitively reflect the internal activity of the nervous system.

Another consideration leads to these assumptions. Any change in the canonical system of binary relations by introducing additional links (pairs  $(q_i, q_j)$  of elements) violates the canonicity of the system of binary relations and requires its normalisation, which is associated with an increase in the order of the matrix and a change in the structure of the graph and the corresponding normal algorithm. Probably something similar occurs in the process of higher nervous activity. A new external stimulus or new needs, which the body's response to these stimuli must meet, is equivalent to establishing new connections in the brain. This violates the "normal

algorithm” existing in the brain and requires its new normalisation, which is because new brain cells are involved. All this is similar to the  $\Delta n$  — transformation of the adjacency matrix until the “algorithm” becomes normal again. One more suggestion should be added. The structure of a normalized matrix always depends on what new links need to be normalised. The emergence of the required new connections will determine the nature and the result of the work of the new algorithm of the nervous system model.

#### 4. The formulation of the problem

From all that has been said above, it is clear that any neural network is a finite state machine. Likewise, any state machine can be replaced with a suitable neural network. Therefore, the problems of structural synthesis, both for the neural networks and the finite machine, can be solved by the same methods.

Consequently, one can try to build a model of the nervous system that organises itself under the influence of external stimuli and find expedient external stimuli and methods of self-organisation. The above assumptions may seem very bold, but automatic devices based on formal neurons have a very high reliability [24], so the solution of the

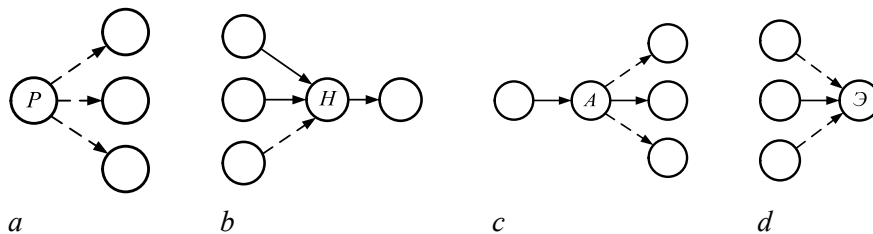
problem of their synthesis is certainly very important and relevant.

Let us consider an example of synthesising a block diagram of a finite machine on formal neurons. In terms of network models, a formal neuron, together with its output (axon), can be represented as an arc of a directed graph, the initial vertex of which must be of the second type, and the final vertex must be of the third type. Let us give conventional names to the types of vertices of the canonical edge graph (Figure 3, *a*) by analogy with neural networks:

- Vertex of the first type is a receptor.
- Vertex of the second type is a neuron.
- Vertex of the third kind is an axon.
- Vertex of the fourth type is an effector.

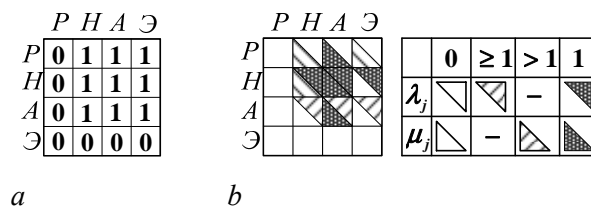
Note that these vertices are considered together with their inputs and outputs. Each of these vertices can be connected by an arc with the other vertices (Figure 3).

Possible connections of neural network vertices are shown in the matrix in Figure 4, *a*. The same figure shows the second matrix (Figure 4, *b*), where the units are replaced by conventional signs that determine the nature of the connections of the arc connecting the nodes of the neural network with other arcs.



**Figure 3.** Types of the neural network vertices:  
*a* — Receptor:  $\rho^{(-)}(p) = 0; \rho^{(+)}(p) \geq 1$ ; *b* — Neuron:  $\rho^{(-)}(H) > 1; \rho^{(+)}(H) = 1$ ;  
*c* — Axon:  $\rho^{(-)}(a) = 1; \rho^{(+)}(a) \geq 1$ ; *d* — Effector:  $\rho^{(-)}(\varepsilon) \geq 1; \rho^{(+)}(\varepsilon) = 0$

Source: made by the author



**Figure 4.** Possible neural network connections:

*a* — Matrix of the connections of neural network vertices;  
*b* — Matrix with conventional signs that determine the nature of the connections of the arcs, and the table with conventional signs

Source: made by the author

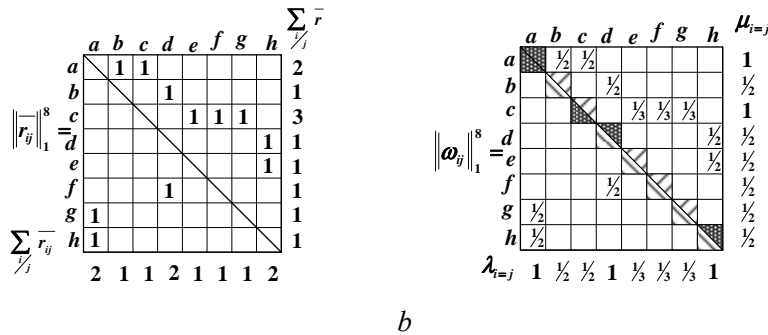
Let us introduce the following characteristics of arc connections in a neural network:

- $\lambda_{j=i}$  — is the specific “load” of the  $j$ -th arc coming out of some vertex, from each of the arcs entering the initial vertex of the  $j$ -th arc;
- $\mu_{i=j}$  — is the “participation share” of the  $i$ -th arc in the “load” of all arcs emerging from the vertex, which is the end of the  $i$ -th arc.

The calculation of  $\lambda_{j=i}$  and  $\mu_{i=j}$  is performed as follows. For a normal adjacency matrix, the matrix  $\|\omega_{ij}\|_1^n$  of the “relative weights” of the elements of the adjacency matrix is calculated.

For each  $r_{ij} = 1$  the corresponding value of  $\omega_{ij}$  will be:

$$\omega_{ij} = \min \left[ \frac{1}{\sum_{i=1/j}^n r_{ij}}; \frac{1}{\sum_{j=1/i}^n r_{ij}} \right].$$



**Figure 5.** Matrixes  $rij1n \|r_{ij}\|_1^n$  and  $oj1n \|\omega_{ij}\|_1^n$ :

- $a - rij1n \|r_{ij}\|_1^n$  — Matrix of connections of the neural network;
- $b - oj1n \|\omega_{ij}\|_1^n$  — Matrix of the relative weights of the neural network elements

Source: made by the author

Then:







$$\lambda_{j=i} = \sum_{i=1/j}^n \omega_{ij}; \mu_{i=j} = \sum_{j=1/i}^n \omega_{ij}.$$

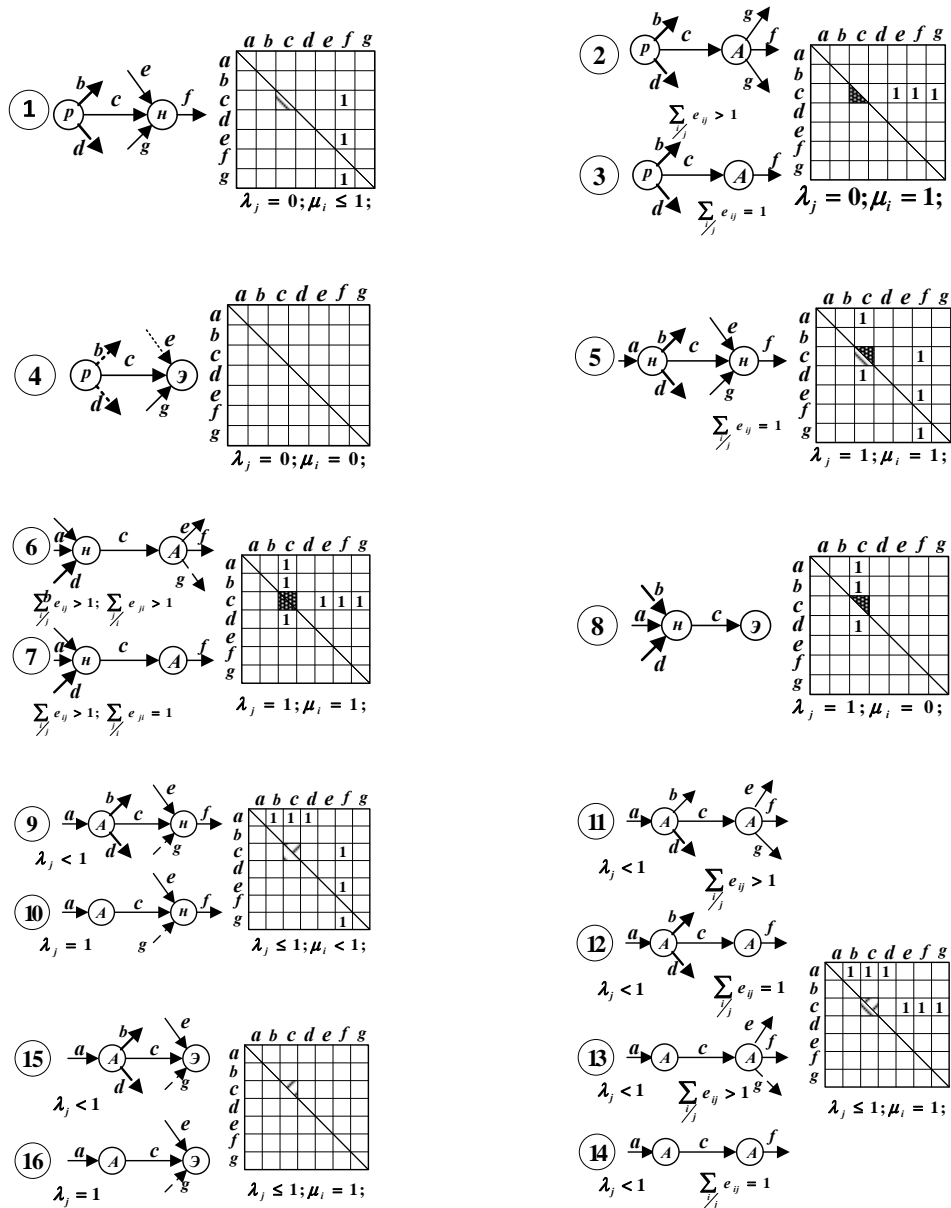
For example, let the matrix  $\|r_{ij}\|_1^n$  be given (see Figure 5, *a*). For this matrix let us calculate the matrix  $\|\omega_{ij}\|_1^n$  and the values  $\lambda_{j=i}$  and  $\mu_{i=j}$  (Figure 5b). Values  $\lambda_{j=i}$ ;  $\mu_{i=j}$ , as well as  $\sum_{i=1/j}^n \bar{r}_{ij}$  and  $\sum_{j=1/i}^n \bar{r}_{ij}$  are calculated for each row of the matrix  $\|r_{ij}\|_1^8$ , completely determine the types of the initial and final vertices of any arc of the edge graph corresponding to one or another row of the matrix. Since an axon can have one or more outputs, the total number of options for arcs connecting the vertices of the neural network is 16. All these options are presented in a matrix and graphical form in Figure 6 and in Tables 1 and 2.

Table 1

Boolean vertexes					
Boolean vertex type	AND-AND	AND-OR	AND-AND/OR	OR-AND	AND/OR-AND
Sub-item number	I	II	III	IV	V

Table 2

Conventional symbols		
$\lambda = 0 \rightarrow$ 	$\mu = 0 \rightarrow$ 	$\lambda \leq 1 \rightarrow$ 
$\mu < 1 \rightarrow$ 	$\lambda = 1 \rightarrow$ 	$\mu = 1 \rightarrow$ 



**Figure 6.** Sub-options of arcs connecting neural network vertices  
Source : made by the author

The same options with the corresponding values  $\lambda_j=i$ ;  $\mu_i=j$ ;  $\sum_{i=1/j} r_{ij}$ ;  $\sum_{j=1/i} r_{ij}$  are presented in Table 3. Table 3 shows the possible types of Boolean vertices, the designation of which is in Tables 1 and 2 and in Figure 7. Taking into account the Boolean types of vertices, the total number of sub-options for neural network arcs will be 110 (see Table 3). The number of such sub-options can be much more if, in addition to Boolean vertices, certain types of vertices with restrictions, vertices with negation, or vertices whose logical functions

are determined by Venn diagrams proposed for a formal neuron [24] will be introduced. The properties of a formal neuron are described in the relevant literature [24; 25], etc.

So, the main elements of neural network models can be represented using the elements (vertices and arcs) of the canonical edge graph.

Next it is necessary to consider an example of constructing a structural diagram of an automaton based on formal neurons (AFN) according to the given functions of this automaton.

Table 3

Characteristics of arcs connections

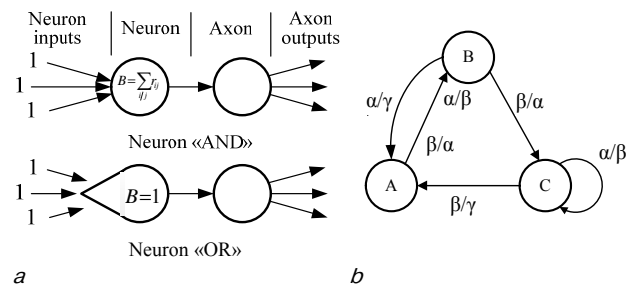
Option number	Properties of the connections				Initial vertex		Final vertex		Number of options
	$\lambda_{j=i}$	$\mu_{i=j}$	$\sum_{i/j} e_{ij}$	$\sum_{j/i} e_{ij}$	View	Boolean type	View	Boolean type	
1	0	$0 < \mu_i < 1$	(0)	(1)	P	I,II,III	H	I,IV,V	9
2	0	1	(0)	>1			A	I,II,III	9
3	0	1	(0)	1			A	I	3
4	0	0	(0)	(0)			$\exists$	I,IV,V	9
5	1	$0 < \mu_i < 1$	>1	(1)	H	I,IV,V	H	I,IV,V	9
6	1	1	>1	>1			A	I,II,III	9
7	1	1	>1	1			A	I	3
8	1	0	>1	(0)			$\exists$	I,IV,V	9
9	$0 < \lambda_i < 1$	$0 < \mu_i < 1$	(1)	(1)	A	I,II,III	H	I,IV,V	9
10	1	$0 < \mu_i < 1$	1	(1)		I	H	I,IV,V	3
11	$0 < \lambda_i < 1$	1	(1)	>1		I,II,III	A	I,II,III	9
12	$0 < \lambda_i < 1$	1	(1)	1		I,II,III	A	I	3
13	1	1	1	>1		I	A	I,II,III	3
14	1	1	1	1		I	A	I	1
15	$0 < \lambda_i < 1$	0	(1)	(0)		I,II,III	$\exists$	I,IV,V	2
16	1	0	1	(0)		I	$\exists$	I,IV,V	3

**5. An example of constructing a block diagram of a finite automaton on formal neurons**

As an example, let's consider the simplest cases when a neuron implements only such logical functions as: "AND" or "OR" (Figure 7, a), which are Boolean. They determine the  $\theta$  value, the threshold of the neuron. Let the finite machine be given by a diagram (Figure 7, b) or Table 4. In order to describe the states of the automaton, one can apply the representation of the states of the automaton using Boolean functions, depending on the reasons that generate these states. You can then replace each of the Boolean expressions containing the same operations with a single character.

Let us compile a Table 5, in which we assign the causes to each new state or output signal which was generated by them in the form of strict disjunctions of the intersections of input signals and current states. For example, in order for the automaton to transfer to the A state, it is necessary

that the input of the machine in state B be given a signal  $a$ , or that the input of the machine in state C be given signal  $b$ . Next let us compose the initial set, which includes all states, all input signals, as well as all necessary combinations of current states and input signals, a set of states, a set of input signals, input and output blocks of the automaton.



**Figure 7.**  
 a — The simplest cases when a neuron implements only such logical functions as: "AND" or "OR";  
 b — Graph implementation of the finite machine

Table 4

Diagram of the finite machine

Initial (current) state	A		B		C	
Initial symbol	a	b	a	b	a	b
Next state	B	B	A	C	C	A
Output symbol	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$

Table 5

States and symbols of the finite machine and their previous combinations

State and symbol of the automata	Previous combination of states and symbols
a	—
b	—
A	$B \cap a \oplus C \cap b$
B	$A \cap a \oplus A \cap b$
C	$B \cap b \oplus C \cap a$
$\alpha$	$A \cap b \oplus B \cap b$
$\beta$	$A \cap a \oplus C \cap a$
$\gamma$	$B \cap a \oplus C \cap b$

Table 6

Designation of both alphabetic and numeric characters and their combinations

Elements of the initial set	Previous combinations of elements of initial states	
Input device	X	
The set of the initial states	$X_1$	X
The set of the input states	$X_2$	X
Input symbols	a	$X_2$
	b	$X_2$
The states of the automata	A	$X_1 \oplus d \oplus e$
	B	$X_1 \oplus f \oplus g$
	C	$X_1 \oplus h \oplus k$
Combinations of current (initial) or next states and input symbols	d	$B \cap a$
	e	$C \cap b$
	f	$A \cap a$
	g	$A \cap b$
	h	$B \cap b$
Input symbols	$\alpha$	$g \oplus h$
	$\beta$	$f \oplus k$
	$\gamma$	$a \oplus e$
The output of the devices	Y	$\alpha \oplus \beta \oplus \gamma$

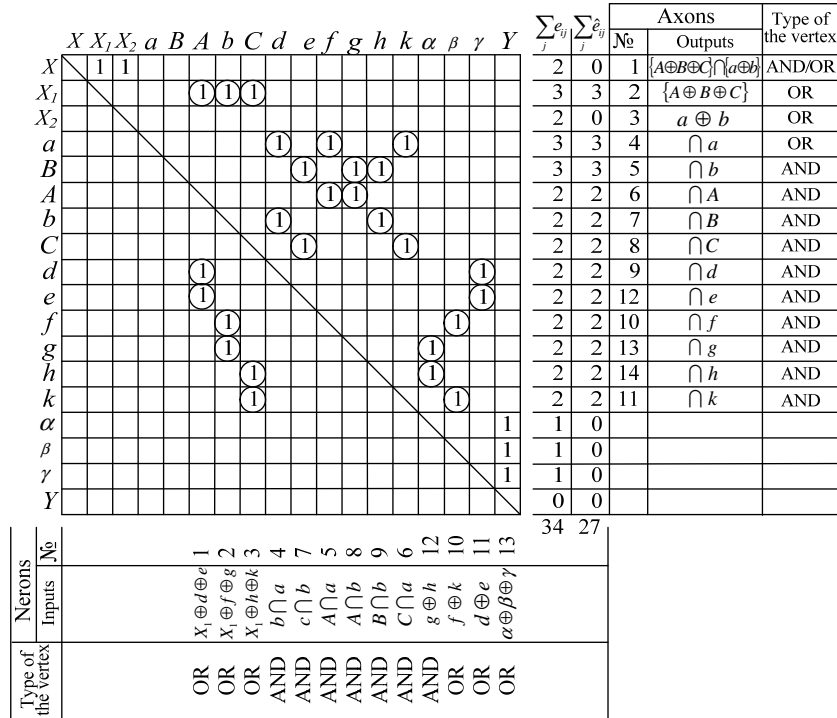
Each of the elements of this set will be assigned an alphabetic or numeric symbol (Table 6). For each element of the second column of Table 6 in the third column we shall indicate those elements that precede the elements of the second column or generate them.

The diagram of the machine under consideration includes six combinations of current states and input signals. Let us designate these combinations with letters: *d, e, f, g, h, k*. Now we can consider the current state of *B* and the input signal as causes that give rise to *d* element, and so on. In turn, the state *B* is generated either by choosing this state from the set  $X_1$  of all initial states, or by the *f* element, or by the *g* element. Table 6 makes it possible to create a matrix of binary relations defined on the original set or an adjacency matrix of elements of the original set (Figure 8). The same figure shows tables of logical functions of neurons and axons.

Obviously, each neuron will be formed from a column that has more than one  $l_{ij} = 1$  element. In turn, each row of the  $\|l_{ij}\|_1^n$  matrix, which has more than one  $l_{ij} = 1$  element, will allow one axon to be formed. Axons will also be formed from those rows in which there will be one  $l_{ij} = 1$  element, if this element is not included in the column from which the neuron will be formed.

The tables of neurons and axons also indicate the logical functions they implement. The functions of neurons are determined directly from Table 6. The outputs of axons  $X, X_1$  and  $X_2$  are determined by the fact that at the same time the machine can be in only one of the three states, and only one of the two signals can be applied to its input. In other cases, axons (in the machine under consideration) transmit the same signal generated by the corresponding neuron through all outputs. For example, the axon defined by the  $i = a$  string simultaneously transmits a signal *a* to *d, f* and *k* elements.

The matrix  $\|l_{ij}\|_1^n$  is normalized. In this case, the cyclomatic number of the graph remains unchanged. In the  $\|l_{ij}\|_1^n$  matrix, the  $l_{ij} = 1$  elements that are subjected to the  $\Delta n$  — transformation are circled. Let us denote these elements as  $\hat{l}_{ij}$ . The condition of conservation of the cyclomatic number allows us to immediately calculate all the main characteristics of canonical graphs (Figure 8):



**Figure 8.** An adjacency matrix of the elements of the original ( $n_0 = 18$ ) set.  
 Logical functions of the neurons and the axons  
 Source : made by the author

- The order of the matrix:  
 $n_k = n_0 + \Delta n = 18 + 27 = 45.$
- The cyclomatic number:

$$v(H_k) = v(G) + \sum_i \sum_j e_{ij} - n_0 + 1 = 34 - 18 + 1 = 17.$$

- The number of arcs of the canonical edge graph:  $v(\bar{Q}_k) = n_k = 45.$
- The number of the vertexes of the canonical edge graph:  
 $v(V_k) = n_k - v(H_k) + 1 = 45 - 17 + 1 = 29.$
- The number of the arcs of the canonical edge graph:

$$v(\Gamma_k) = \sum_i \sum_j e_{ij} + \sum_i \sum_j \hat{e}_{ij} = 34 + 27 = 61.$$

- The number of the vertexes of the canonical vertex graph:  $v(Q_k) = n_k = 45.$

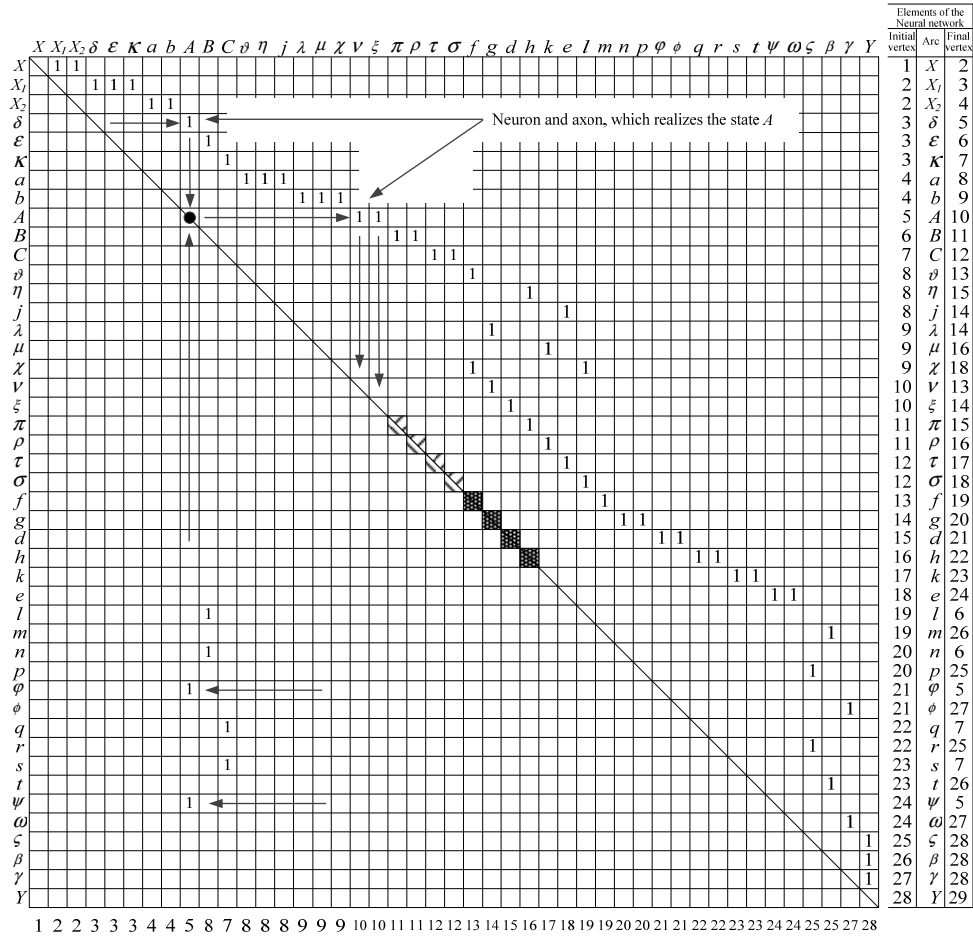
The normal matrix  $\|\bar{r}_{ij}\|_1^n$  of the finite machine neural network is shown in Figure 9. Table 7 summarizes the characteristics of the arcs of the canonical edge graph with their initial and final vertices as elements of a neural network of a finite machine. The construction of a block diagram of a finite automaton by the  $\|\bar{r}_{ij}\|_1^n$  matrix (Figure 9) and Table 7 is easy. Scheme in the form of an edge graph is shown in Figure 10. It is easy to verify that this circuit exactly performs the functions of a given finite state machine.

Let us set the automaton represented by the diagram in Figure 7, *b*, initial state *A* and input signal program *ababab ...*

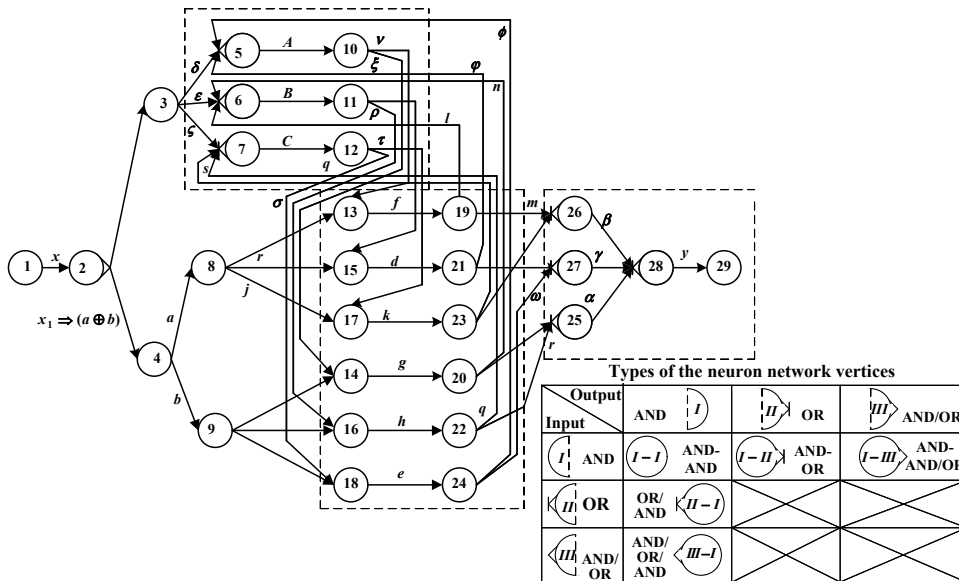
Then the alternation of new states and output signals will be as follows:

- Initial and current state of *ABCCAB ...*;
- *ababab...* inputs;
- Following states *BCCAB ...*;
- Output signals *βαβγβ ...*





**Figure 9.** The normal matrix  $\|\bar{r}_{ij}\|_1^n$  of the finite machine  
 Source : made by the author



**Figure 10.** The graph of a finite automaton  
 Source : made by the author

Table 7

The characteristics of the arcs of the canonical edge graph with their initial and final vertices as elements of a neural network of a finite machine

Elements of the finite machine	Initial vertex		Purpose of the finite state machine element	Final vertex	
	Type	Input function		Type	Output function
Input device. Sensors of initial states and input symbols	I	START	The task of start and the work of the program	III	$X_1 \cap X_2$
	III	$X_1 \cap X_2$	Setting initial states	II	$A \oplus B \oplus C$
			Setting input symbol	III	$a \oplus b$
Signal transmission operations	II	$X_1 \Rightarrow A \oplus B \oplus C$	Passing command to state $A$	IV	$A$
			Passing command to state $B$	IV	$B$
			Passing command to state $C$	IV	$C$
Neurons — Axons	II	$X_2 \Rightarrow a \oplus b$	Passing input symbol $a$	I	$Ua$
			Passing input symbol $b$	I	$Ub$
	IV	$A \oplus d \oplus e$ $B \oplus f \oplus g$	State implementation $A$	I	$UA$
			State implementation $B$	I	$UB$
Signal transmission operations	I	$a$	Passing input symbol $a$	I	$f$
					$d$
					$K$
	I	$b$	Passing input symbol $b$	I	$g$
					$h$
$e$					
I	$A$	Passing command: current state $A$	I	$f$	
				$d$	
I	$B$	Passing command: current state $B$	I	$K$	
				$g$	
I	$C$	Passing command: current state $C$	I	$h$	
Neurons — Axons	I	$A \cup a$ $A \cup b$ $B \cup a$ $B \cup b$ $C \cup a$ $C \cup b$	The formation of $f$ signal	I	$Uf$
			The formation of $g$ signal		$Ug$
			The formation of $d$ signal		$Ud$
			The formation of $h$ signal		$Uh$
			The formation of $K$ signal		$UK$
			The formation of $e$ signal		$Ufe$
Signal transmission operations	I	$f$ $g$ $d$ $h$ $K$ $e$	Passing signal $f$	IV	$\beta$
			Passing signal $g$		$\beta$
			Passing signal $d$		$B$
			Passing signal $h$		$d$
			Passing signal $K$		$A$
			Passing signal $e$		$\gamma$
Neurons — Axons	IV	$g \oplus h$	The formation of the output symbol $\alpha$	IV	$\alpha \oplus \beta \oplus \gamma$
		$f \oplus K$	The formation of the output symbol $\beta$		
		$d \oplus e$	The formation of the output symbol $\gamma$		
Output device	IV	$\alpha \oplus \beta \oplus \gamma$	Passing of the output symbol	I	$Y$

Let us check the operation of the neural network according to the given program.

1. The input device  $X$  sets the program of work for the sensor of initial states  $X_1$  and the sensor of input  $X_2$  signals.

2. The sensor of initial states  $X_1$  generates a command to transfer the automaton to  $A$  state.

3. The input signal of sensor  $X_2$  generates input signals according to the program specified by the input  $X$  device.

4. The command to switch the automaton to state  $A$  is transmitted along the arc  $3 \rightarrow 5$  to neuron 5, which implements the specified state on the arc  $A$  ( $5 \rightarrow 10$ ) at the  $t_0$  moment. The signal about this, equal to 1, is transmitted at the moment  $t_0 + 1$  to vertices 13 and 14.

5. From vertex 4, the signal  $|a| = 1$  is transmitted along arcs  $4 \rightarrow 8$  and  $8 \rightarrow 13$ ,  $8 \rightarrow 15$  and  $8 \rightarrow 17$  to vertices 13, 15 and 17.

6. Vertex 13 is the initial vertex of the neuron "AND", the threshold of which is equal to:  $\theta = 2$ . Since two signals come to this vertex, neuron 13 generates a signal:  $f = A \wedge a$ , which is transmitted at the moment  $t_0 + 2$  to vertices 6 and 26.

7. When the signal  $|f| = 1$  enters vertex 6, this neuron implements state  $B$ , and at time  $t_0 + 3$  the axon sends a single signal about this to vertices 15 and 16. At the same time, neuron 26 generates a  $\beta$  signal, which at time:  $t_0 + 3$  is transmitted to the output  $Y$  device.

8. Since the input signal  $a$  is implemented at time:  $t_0 + 2$ , then the element  $X_2$  at time:  $t_0 + 2$  generates signal  $b$ , which is transmitted to vertices 14, 16 and 18.

9. At vertex 16, the sum of the input signals is equal to the threshold, so neuron 16 generates an  $h$  signal, which at time:  $t_0 + 3$  is transmitted from vertex 22 to vertices 7 and 25.

10. Neuron 7 implements  $C$  state and neuron 25 generates  $\alpha$  signal.

Further operation of the machine is evident and does not require explanation. It is clear that the obtained scheme can be completely replaced by a real construction, including certain physical models of formal neurons. The above example shows the synthesis of a very simple machine, but the same general principles can be applied to synthesise other, more complicated machine.

## Conclusion

1. The structure of the basic elements of AFN allows their convenient graphical representation in

the form of basic elements of canonical edge graphs. At the same time, the representation of the AFN elements, in which logical functions are implemented, is provided by means of those elements of the canonical edge graph, in which logical functions are also implemented.

2. The similarity of the structures of canonical edge graphs and automation on formal neurons (AFN) allows building block diagrams of AFN automatically, provided that the sets of the states, the input and output signals of the original finite machine are specified in the form of a finite vertex graph.

3. The implementation of  $\Delta n$  — transformation and matrix normalization make it possible to arrange the DFSM using a linear algorithm, and sometimes polynomial in complexity.

4. The main advantage of this approach is that in its implementation the representation of complicated logical functions does not require the use of polynomial algorithms for programming.

5. Abandoning polynomial algorithms for the representation of logical functions will eventually lead to a decrease in energy costs and an increase in accuracy in their calculation. In terms of chip and printed circuit board technologies, this can lead to a reduction in chip size and thickness.

## References

1. Minsky M. *Computation. Finite and infinite machines*. Prentice Hall International, 1972.
2. McCallough WS, Pitts W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943;5:115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
3. Barkalov A, Titarenko L. *Logical synthesis for FSM-based Control Units*. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Science & Business Media; 2009. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-04309-3>
4. Bordihn H, Holzer M, Kutrib M. Determination of finite automata accepting subregular languages. Giessen: Elsevier, 2009.
5. Lamberti G, Scandale M. Incremental determination and minimization of finite acyclic automata. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Manchester, UK, 2013;2250–2257. <https://doi.org/10.1109/SMC.2013.385>
6. Gandhi A, Ke NR, Khoussainov B. Descriptive complexity of determinization and complementation for finite automata. *Proceedings of the Seventeenth Computing: The Australasian Theory Symposium*. Australia, 2011; 119:95–104.
7. Buchsbaum AL, Giancarlo R, Westbrook JR. On the determination of weighted finite automata. *Society for*

*Industrial and Applied Mathematics*. 2000;30(5):1502–1531.

8. Shalyto A. Logic Control and “Reactive” systems: Algorithmization and programming. *Automation and Remote Control*. 2001;1:1–29. (In Russ.)

9. Vinogradova M, Tkachev S, Kandaurova I. The determining finite automata process. *Mathematics and Mathematical Modeling*. 2017;4:1–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.24108/mathm.0417.0000067>

10. Gorachkin B. The development of the theory of finite automata and its applications. *Engineering bulletin*. 2015;4:538–542. (In Russ.) EDN: TVWZNT

11. Verevkin A, Kiryushin O. The Synthesis of Complex Logical Controllers with Variables of Boolean and Fuzzy Logics. *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*. Ufa: Atlantis Press; 2019. <https://doi.org/10.2991/itids-19.2019.9>

12. Burdonov IB, Kosachev AS, Kulyamin VV. The use of finite automata for testing programs. *Programming*. 2000;2:12–28. (In Russ.)

13. Kleene S. Introduction to metamathematics. *Bull. Math. Biophys.* 1943;5:115–133.

14. Godel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931;1(38): 173–198. <https://doi.org/10.1007/BF01700692>

15. Turing A. Can a Machine Think? The World of Mathematics Universal Turing Machine. *The world of Mathematics*. 1956;4:2109.

16. Post E. Formal Reductions of General Combinatorics Decision Problem. *American Journal of Mathematics*. 1943;65(2):197–215.

17. Mitchell M. *An introduction to the genetic algorithms*. London: MIT Press Cambridge, Massachusetts; 1999.

18. Fogel L, Owens A, Walsh MJ. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. NY: Wiley; 1966.

19. Bukatova I. *Evolutionary Modelling and its Applications*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. (In Russ.)

20. Zaikin AK. Development of finite automata creation methods with annealing simulation algorithm by the “War for resources” example. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2011;2(72):49–54. (In Russ.) EDN: NECKCX

21. Harman M, Mansouri A, Zhang Y. Search-Based Software Engineering: A Comprehensive Analysis and Review of Trends, Techniques, and Applications,” Dept. of Computer Science. London: King’s, 2007.

22. Rosenblatt F. *Principles of neurodynamics*. Buffalo: Cornell Neurological Laboratory, 1965.

23. Malinin LI, Malinina NL. *On the solution of Graph Isomorphism*. 2022. (In Russ.) Available from: [https://www.researchgate.net/publication/358570634\\_On\\_the\\_solution\\_of\\_the\\_Graph\\_Isomorphism\\_Problem](https://www.researchgate.net/publication/358570634_On_the_solution_of_the_Graph_Isomorphism_Problem).

24. Arbib MA. *Brains, machines and mathematics*. McGraw-Hill, 1964.

25. Nechiporenko V. *Structural analysis and methods for building reliable systems*. Moscow: Sovetskoe Radio, 1968. (In Russ.)

#### About the author

**Natalia L. Malinina**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department 604, Aerospace Faculty, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0116-5889; [malinina806@gmail.com](mailto:malinina806@gmail.com)



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-365-372

УДК 539.3


EDN: HGUWLO

Научная статья / Research article

## Исследование прогиба брусьев различной ширины методом Тагучи

Н.С. Рзаев  

Бакинский инженерный университет, Баку, Республика Азербайджан

 nrzayev@beu.edu.az

### История статьи

Поступила в редакцию: 17 мая 2023 г.

Доработана: 22 августа 2023 г.

Принята к публикации: 17 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Исследован прогиб брусьев различной ширины, изготовленных из алюминиевого материала, методом Тагучи. Ширина образцов, выбранных для эксперимента, составляет 10, 15 и 20 мм, а приложенная нагрузка — 500, 1000 и 1500 г. Опыты проводились при положении бруса с одним закрепленным и другим свободным концом, а также в позиции с обоими свободными концами. Нагрузка приложена к центральной точке бруса. Обработка результатов эксперимента осуществлялась по плану «Тагучи  $L18 (3^2 \times 2^1)$ » с использованием программы «Minitab». На основании результатов эксперимента построены графики, описывающие взаимосвязь между прогибом, нагрузкой и шириной бруса в зависимости от варианта его установки (позиционирования). В исследовании также проведен анализ результатов эксперимента. Определено, что оптимальными значениями оперируемых (контролируемых) параметров прогиба являются уровень 2 (*B*) для условий размещения (позиционирования), уровень 1 для приложенной нагрузки (500 г) и уровень 3 (20 мм) для ширины бруса. Согласно результатам ANOVA, основным фактором, влияющим на прогиб, является нагрузка, приложенная к бруссу. Коэффициент относительного воздействия составляет 40,12 %. Коэффициент относительного влияния условий позиционирования на прогиб составляет 29,68 %, а коэффициент относительного влияния ширины бруса — 18,30 %. По результатам регрессионного анализа создана математическая модель изменения прогиба в зависимости от нагрузки и ширины бруса соответственно положению установки бруса.

**Ключевые слова:** вариационный анализ, способ крепления концов стержней, нагрузка, управляемые факторы, регрессивный анализ

### Для цитирования

Рзаев Н.С. Исследование прогиба брусьев различной ширины методом Тагучи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 365–372. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-365-372>

© Рзаев Н.С., 2023



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

## A study of deflection of rods with different widths using the Taguchi method

Natig S. Rzayev  

Baku Engineering University, Baku, Republic of Azerbaijan  
nrzayev@beu.edu.az

### Article history

Received: May 17, 2023

Revised: August 22, 2023

Accepted: September 17, 2023

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Abstract.** The deflection of rods with different widths made of aluminum material was studied using the Taguchi method. The widths of the samples selected for the experiment are 10, 15 and 20 mm, while the applied load is 500, 1000 and 1500 g. The experiments were carried out with the rod in position with one fixed and the other free ends, as well as in position with both free ends. The load was applied to the central point of the rod. The results of the experiment were processed according to the Taguchi  $L18 (3^2 \times 2^1)$  plan using the Minitab program. Based on the experimental results, graphs describing the relationship between deflection, load and rod width according to the option of its installation (positioning) are plotted. The study also analysed the results of the experiment. The optimum values of the operated (controlled) deflection parameters were determined to be level 2 (*B*) for placement (positioning) conditions, level 1 for the applied load (500 g) and level 3 (20 mm) for the rod width. According to the results of ANOVA, the main factor affecting the deflection is the load applied to the rod. The relative impact coefficient was 40.12 %. The relative influence coefficient of positioning conditions on deflection was 29.68 % and the relative influence coefficient of rod width was 18.30 %. Based on the results of regression analysis, a mathematical model of deflection variation as a function of load and rod width was developed accordingly to the position of rod installation.

**Keywords:** variance analysis, method of fixing the rod ends, load, controllable factors, regression analysis

### For citation

Rzayev NS. A study of deflection of rods with different widths using the Taguchi method. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):365–372. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-365-372>

### Введение

Брусья из алюминиевого материала нашли широкое применение в различных областях науки, техники и производства. В процессе эксплуатации эти брусья сгибаются и теряют устойчивость под воздействием разного рода нагрузок. В то же время является актуальным анализ прогиба, образующегося в брусьях. Детально изучены вопросы устойчивости в брусьях. Разработана методика теоретического расчета прогиба для различных ситуаций. Но проведенные эксперименты показывают, что между теоретическими и полученными фактическими данными есть веские различия. В связи с этим анализ экспериментально полученных значений прогиба в брусьях также является актуальным.

Как известно, имеются случаи, когда плоскость воздействия сил на брус проходит через его ось. В результате действия подобных сил в сечениях, перпендикулярных оси, появляются внутренние силовые факторы. В этом случае брусья подвергаются деформации прогиба. Получены дифференциальные зависимости между прогибающим моментом, силой среза и распределенной нагрузкой для случая прогиба прямых брусьев. Также выведены формулы для расчета прогиба и угла поворота при различных нагружениях в зависимости от размеров бруса, модуля упругости и приложенной нагрузки<sup>1</sup>.

Получены модельные уравнения брусьев при различных условиях и положениях нагружения. Одновременно проведен анализ величин прогиба брусьев в различных сечениях. Исследовано влияние на прогиб таких параметров, как момент инерции, модуль упругости,

<sup>1</sup> Салахутдинов Ш.А., Одицова С.А., Шейкман Д.В. Сопrotвление материалов // Инфра-Инженерия. 2022. 192 с.

нагрузка, сжимающая сила (сила сжатия). Даны результаты влияния сил сжатия на систему. С помощью специальных симуляционных программ смоделировано соответствие закономерности изменению прогиба. Результаты программной симуляции (моделирования) сравнивались со значениями, полученными в результате эксперимента. При этом линейные размеры поперечного сечения бруса принимались постоянными [1; 2].

Проведен экспериментальный и теоретический анализ прогиба брусьев различного размера под действием статической нагрузки в пределах упругости (эластичности). В некоторых точках образца было получено описание профилей прогибов и измерены значения их величин. По методу Тагучи разработан экспериментальный анализ прогиба брусьев, подвергнутых деформации продольного прогиба. Здесь, в лабораторных условиях, был осуществлен эксперимент по продольному прогибу стальных брусьев и проанализированы полученные результаты. При планировании эксперимента и математико-статистическом анализе полученных результатов использовались метод Тагучи и программа «Minitab». В зависимости от приложенной вдоль оси нагрузки и крепления концов брусьев (соотношения длин бруса) определен поперечный прогиб и изучена закономерность его изменения. Установлено, что для шарнирного соединения концов брусьев прогиб при осевом нагружении получается меньше. Также установлено, что прогиб более интенсивен при больших значениях нагрузок. При этом было принято, что нагрузка действует на три точки бруса, а поперечное сечение бруса — неизменно [3–7].

В представленной работе впервые изучено изменение прогиба в зависимости от ширины бруса, приложенной нагрузки и варианта установки бруса. Результаты эксперимента обработаны методом Тагучи.

## 1. Методы

В соответствии с требованиями, указанными в нормативно-технической документации экспериментально-испытательного стенда, было отобрано три образца бруса различной ширины. Информация по образцам представлена далее:

длина:  $L = 510$  мм;

толщина: 5 мм;

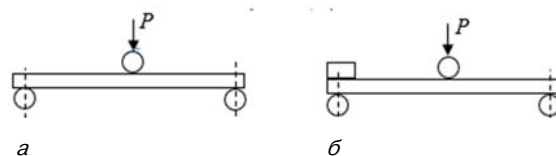
ширина: 10 мм; 15 мм; 20 мм;

модуль упругости: 70 ГПа.

Эксперимент проводится при двух разных вариантах установки (позиционирования) с применением трех разных нагрузок. Прилагаемые нагрузки: 500, 1000 и 1500 г соответственно. Два различных варианта установки были приняты следующим образом:

➤ брус не закреплен с обеих сторон (свободно позиционирован с двух сторон). Этот вариант установки условно принимаем за *A* (рис. 1, *a*);

➤ брус закреплен с одной стороны и свободен с другой (свободно позиционирован с одной стороны). Этот вариант установки был принят как *B* (рис. 1, *б*).



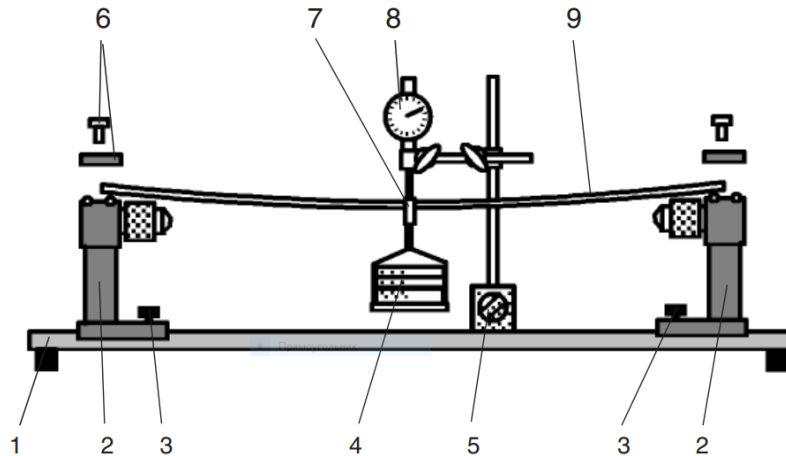
**Рис. 1.** Схемы установки бруса:  
*a* — брус не закреплен с обеих сторон;  
*б* — брус закреплен с одной стороны и свободен с другой.  
Источник: составлено автором

**Figure 1.** Rod installation diagrams:  
*a* — the beam is not fixed on both sides;  
*б* — the beam is fixed on one side and free on the other  
Source: made by the author

Эксперименты проводились на стенде W100 для испытаний на прогиб. Структурная схема такой экспериментальной компоновки стенда выглядит следующим образом (рис. 2).

В случае с вариантом для положения *A* образец 9 размещают на цилиндрических элементах подвижных опор 2 и прикладывают нагрузку 4 к центральной точке. А в случае с вариантом для положения *B* образец с одной из сторон жестко соединяется с опорой с помощью крепежного элемента и прижимной пластины 6. Значение прогиба фиксируется при помощи измерительного прибора 8.

Эксперимент был построен по плану Тагучи  $L18 (3^2 \times 2^1)$ . То есть количество оперируемых (контролируемых) факторов равно 2, количество экспериментов равно 27, а количество повторений равно 3. Оперлируемые (контролируемые) факторы и их уровни приведены в табл. 1.



**Рис. 2.** Схема станда для испытаний на прогиб:

1 — корпус; 2 — подвижные опоры; 3 — крепежный элемент для опоры;  
4 — груз; 5 — магнитный держатель; 6 — крепежный элемент и прижимная пластина;  
7 — элемент силовой передачи; 8 — измерительный прибор; 9 — тестовый образец

**Figure 2.** Diagram of the deflection test bench:

1 — Housing; 2 — Movable supports; 3 — Fastening element for support;  
4 — Load; 5 — Magnetic holder; 6 — Fastening element and pressure plate;  
7 — Power transmission element; 8 — Measuring device; 9 — Test sample

Таблица 1 / Table 1

**Оперлируемые (контролируемые) факторы и их уровни /  
Operated (controlled) factors and their levels**

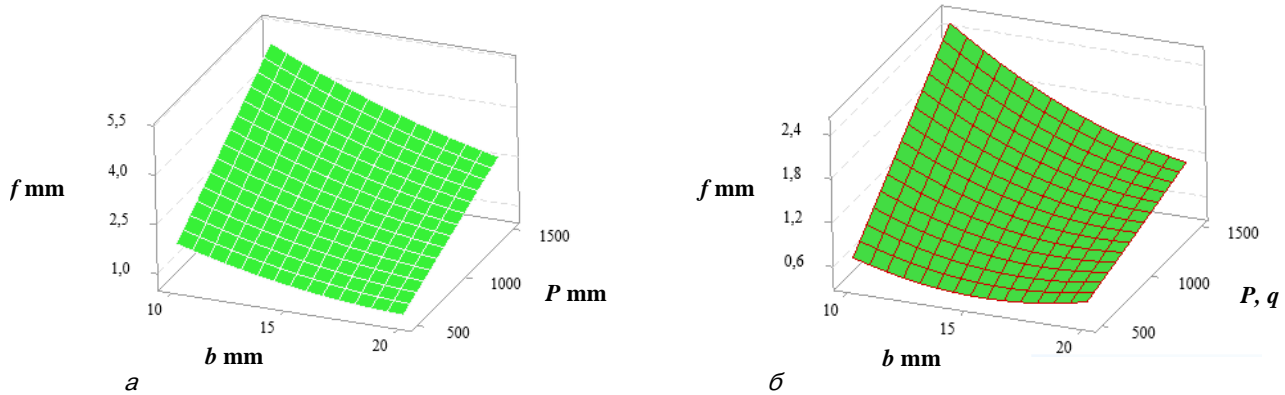
Оперлируемые факторы / Operated factors	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit of measurement	Уровень 1 / Level 1	Уровень 2 / Level 2	Уровень 3 / Level 3
Нагрузка / Load	<i>P</i>	<i>q</i>	500	1000	1500
Ширина бруса / Beam width	<i>B</i>	mm	10	15	20
Вариант установки / Installation option	<i>A; B</i>	-	<i>A</i>	<i>B</i>	-

## 2. Результаты эксперимента

В табл. 2 приведены полученные экспериментальным путем средние значения прогиба в зависимости от ширины бруса, величины приложенной нагрузки и варианта установки (позиционирования). Также в графической форме на рис. 3, *a, б*, показано влияние вариантов установки (позиционирования), влияние нагрузки и ширины бруса на прогиб. Для варианта установки (позиционирования) *A*, когда приложенная нагрузка составляет 500 г, прогиб уменьшается на 0,5 мм, когда ширина бруса увеличивается с 10 до 15 мм, и уменьшается на 0,29 мм, когда ширина бруса увеличивается с 15 до 20 мм. Эти, указанные выше, значения составляют соответственно 1,19 и 0,52 мм, если приложенная нагрузка 1000 г, а при нагрузке в 1500 г состав-

ляют соответственно 1,81 и 0,78 мм. Для варианта установки (позиционирования) *B*, когда приложенная нагрузка составляет 500 г, прогиб уменьшается на 0,18 мм, когда ширина бруса увеличивается с 10 до 15 мм и уменьшается на 0,14 мм при увеличении ширины бруса с 15 до 20 мм. Эти значения составляют 0,48 и 0,24 мм соответственно для приложенной нагрузки в 1000 г и 0,78 и 0,4 мм соответственно для приложенной нагрузки в 1500 г. Как видно из результатов, величина прогиба уменьшается при сохранении постоянной нагрузки и увеличении ширины бруса, а также при увеличении нагрузки и сохранении постоянным ширины бруса. Сравнительный анализ значений показывает, что величина прогиба в положении *B* уменьшается на 50÷55 % по сравнению с положением *A* (рис. 3, *a, б*).





**Рис. 3.** Поверхностный график для прогиба:  
*a* — вариант установки (позиционирования) *A*; *б* — вариант установки (позиционирования) *B*  
 И с т о ч н и к : составлено автором

**Figure 3.** Surface plot for deflection:  
*a* — installation option *A* (positioning); *б* — installation option *B* (positioning)  
 S o u r c e : made by the author

### 3. Анализ результатов эксперимента

#### 3.1. Анализ соотношения сигнал/шум (S/N)

Необходимо рассчитать соотношения сигнал/шум (S/N) по целевой функции, соответствующей экспериментальным данным. Выделяют три основные целевые функции [10]:

1. Самый большой (наибольший) — лучший;
2. Самый маленький (наименьший) — лучший;
3. Номинальный — лучший:

В рассматриваемой работе, чтобы брус был качественным, прогиб должен быть наименьшим. Поэтому при анализе результатов была выбрана целевая функция «Наименьший — лучший».

В табл. 2 показаны экспериментально полученные значения прогиба и соотношения

сигнал/шум, полученные методом Taguchi  $L18 (3^2 \times 2^1)$ .

На основе таблицы ответов по Тагучи для оптимальных значений прогиба определяется уровень оперируемых (контролируемых) факторов, таких как варианты установки (позиционирования), приложенная нагрузка и ширина бруса. Были получены параметры, обеспечивающие оптимальный уровень прогиба по соотношениям сигнал/шум, составляющие 0,0090 для вариантов установки (позиционирования),  $-0,52444$  для ширины бруса и 2,12549 для приложенной нагрузки (табл. 3). Здесь рассматривалась целевая функция «Наименьший — лучший». Оптимальными значениями контролируемых параметров прогиба были уровень 2 (*B*) для вариантов установки (позиционирования), уровень 1 для приложенной нагрузки (500 г) и уровень 3 для ширины бруса (20 мм) (рис. 4).

Таблица 2 / Table 2

**Результаты эксперимента по соотношению S/N / Results of the experiment on the S/N ratio**

Оперлируемые (контролируемые) факторы / Operated (controlled) factors			Выходной фактор / Output factor	Результаты анализа методом Тагучи / The results of the Taguchi method analysis
Вариант установки / Installation option	Нагрузка <i>P</i> , г / Load <i>P</i> , g	Ширина <i>b</i> , мм / Width <i>b</i> , mm	Прогиб <i>f</i> , мм / Deflection <i>f</i> , mm	Соотношение S/N для прогиба, dB / S/N ratio for deflection, dB
<i>A</i>	500	10	1,670	-4,4543
<i>A</i>	500	15	1,106	-0,8751
<i>A</i>	500	20	0,816	1,7662
<i>A</i>	1000	10	3,416	-10,6704
<i>A</i>	1000	15	2,223	-6,9388
<i>A</i>	1000	20	1,703	-4,6243
<i>A</i>	1500	10	5,193	-14,3084
<i>A</i>	1500	15	3,383	-10,5860

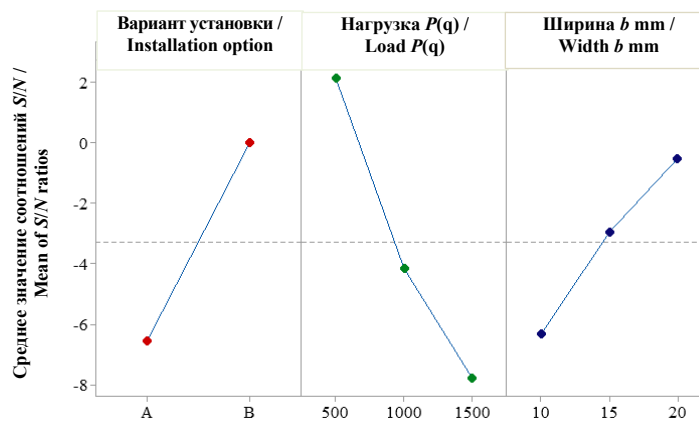
Окончание табл. 2 / Ending of the Table 2

Оперируемые (контролируемые) факторы / Operated (controlled) factors			Выходной фактор / Output factor	Результаты анализа методом Тагучи / The results of the Taguchi method analysis
Вариант установки / Installation option	Нагрузка $P$ , г / Load $P$ , g	Ширина $b$ , мм / Width $b$ , mm	Прогиб $f$ , мм / Deflection $f$ , mm	Соотношение S/N для прогиба, dB / S/N ratio for deflection, dB
A	1500	20	2,600	-8,2995
B	500	10	0,720	2,8534
B	500	15	0,536	5,4167
B	500	20	0,396	8,0461
B	1000	10	1,550	-3,8066
B	1000	15	1,070	-0,5877
B	1000	20	0,823	1,6920
B	1500	10	2,403	-7,6151
B	1500	15	1,620	-4,1903
B	1500	20	1,220	-1,7272

Таблица 3 / Table 3

Таблица ответов для S/N и прогиба / Response table for S/N and deflection

Уровень / Level	Вариант установки (позиционирования) / Installation (positioning) option	Нагрузка, г / Load, g	Ширина бруса, мм / Beam width, mm
1	-6,55451	<b>2,12549</b>	-6,33357
2	<b>0,00903</b>	-4,15596	-2,96020
3	-	-7,78774	<b>-0,52444</b>
Delta	6,56354	9,91323	5,80913
Rank	2	1	3

График основных эффектов для соотношений S/N: значения данных /  
Main effects plot for S/N ratios: data meansРис. 4. График взаимозависимости прогиба с вариантом установки (позиционирования), нагрузкой и шириной бруса  
Источник: составлено авторомFigure 4. Graph of the relationship between deflection and installation (positioning) option, load and rod width  
Source: made by the author

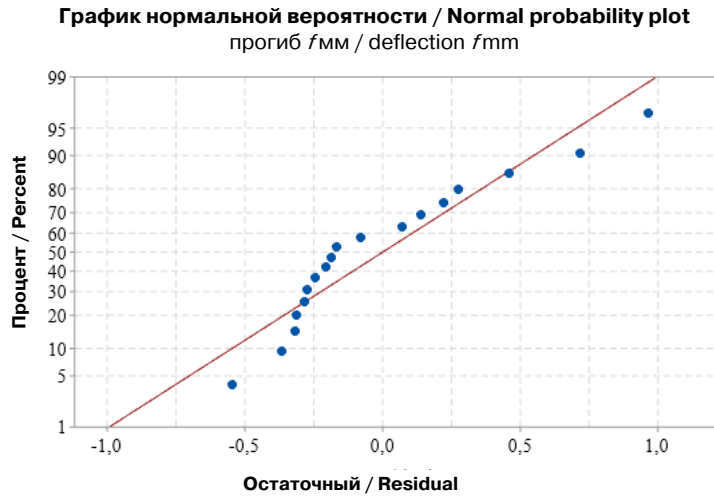
### 3.2. Вариационный анализ (ANOVA)

Вариационный анализ (ANOVA) выполняется для определения отдельных влияний оперируемых (контролируемых) факторов [8–13]. В табл. 4 даны результаты вариационного анализа, показывающие влияние приложенной нагрузки, ширины бруса и вариантов установки (позиционирования) на прогиб при уровне на-

дежности — 88 %. В этой работе, по результатам вариационного анализа, наиболее воздействующим параметром является фактор нагрузки, приложенный к брусу. Соотношение (коэффициент) воздействия составляет 40,12 %. Соотношение (коэффициент) воздействия вариантов установки (позиционирования) на прогиб составляет 29,68 %, а соотношение (коэффициент) воздействия ширины бруса — 18,30 %. Кроме

того, был построен график нормальной вероятности. График нормальной вероятности характеризует отклонение отдельных значений по

сравнению с уравнением регрессионной модели. Точки, сгруппированные вокруг линии, указывают на меньшее отклонение (рис. 5)



**Рис. 5.** График нормальной вероятности. И с т о ч н и к : составлено автором  
**Figure 5.** The graph of normal probability. S o u r c e : made by the author

Таблица 4 / Table 4

**Результаты вариации для прогиба / Results of variation for deflection**

Источник / Source	Степень свободы / Degree of freedom	Последовательная сумма квадратов / Ssequential sum of squares	Скорректированная сумма квадратов / Adjusted sum of squares	Скорректированные средние квадраты / Adjusted mean squares	P значение, регресс, % / Pvalues, regression, %	Степень воздействия / Degree of exposure, %
Вариант установки / Installation option	1	7,699	7,699	7,6989	0,000	29,68
Нагрузка / Load	2	10,407	10,407	5,2035	0,000	40,12
Ширина / Width	2	4,749	4,749	2,3743	0,004	18,30
Погрешность остатка / Margin of error	12	3,088	3,088	0,2573	–	11,90
Всего / Total	17	25,942	–	–	–	100,00

### 3.3. Регрессионный анализ

Регрессионный анализ используется для моделирования и анализа различных переменных, которые имеют связь между одной зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными. Для этого был проведен регрессионный анализ с использованием программы minitab для математического моделирования взаимодействия оперируемых (контролируемых) факторов и прогиба. В результате были получены следующие уравнения регрессии:

Положение A:

$$f = 2,443 + 0,001862P - 0,1232b, \quad (1)$$

Положение B:

$$f = 1,135 + 0,001862P - 0,1232b. \quad (2)$$

Как видно из уравнения, величина прогиба увеличивается с постоянным увеличением массы груза. Она уменьшается с увеличением ширины бруса. На основе этой модели можно рассчитать оптимальную величину прогиба в пределах заданных значений нагрузки и ширины.

## Заклучение

Основные результаты, полученные в ходе исследования.

1. По результатам экспериментов построены трехмерные поверхностные графики, характеризующие изменение прогиба в зависимости от уровней оперируемых (контролируемых) факторов. Определено, что значение прогиба при варианте установки (позиционирования) *B* примерно на 50% меньше, чем при варианте установки (позиционирования) *A*.

2. По соотношениям S/N оптимальными значениями контролируемых параметров прогиба были уровень 2 (*B*) для вариантов установки, уровень 1 для приложенной нагрузки (500 г) и уровень 3 для ширины бруса (20 мм).

3. С помощью вариационного анализа определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на прогиб. Согласно результатам ANOVA, наиболее воздействующим параметром является фактор нагрузки, приложенный к брусу. Соотношение (коэффициент) воздействия составляет 40,12 %. Получено соотношение (коэффициент) воздействия вариантов установки (позиционирования) на прогиб — 29,68 % и соотношение (коэффициент) воздействия ширины бруса — 18,30 %.

4. С помощью программы «Minitab» проведен регрессионный анализ результатов эксперимента, получена математическая модель зависимости прогиба от приложенной нагрузки и ширины бруса по условиям установки (позиционирования).

## Список литературы / References

1. Pokhrel PR, Lamsal B. Modeling and parameter analysis of deflection of a beam. *Bibechana*. 2021;18(1):75–82. <https://doi.org/10.3126/bibechana.v18i1.29359>
2. Ibhado OO, Dagwa IM, Asibor JO, Omo-Oghogho E. Development of a Computer Aided Beam Deflection Analysis (CABDA) Program for Simply Supported Loaded Beams. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2016;30:23–38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.30.23>
3. Mirzayev H, Rzayev N. Boyuna əyilmə deformasiyasına məruz qalan millərdə əyintinin Taquçı

metodu ilə eksperimental tədqiqi. *Journal of Baku Engineering University. Mechanical and industrial engineering*. 2022;6(2):59–66. (Azerbaij.)

4. Gurumoorthy S, Bhaskara Rao L. Simulation and Experimental Substantiation of Beam Deflection under Guided End Conditions. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019;9(2):1782–1791. <https://doi.org/10.35940/ijitee.B7668.129219>

5. Ravikumar M, Reddappa HN, Suresh R. Aluminium composites fabrication technique and effect of improvement in their mechanical properties — A review. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5((11)3):23796–23805. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.171>

6. Farsi A, Pullen D, Latham J-P, Bowen J, Carlsson M, Stitt EH, Marigo M. Full deflection profile calculation and Young's modulus optimisation for engineered high performance materials. *Scientific Report*. 2017;7:46190. <https://doi.org/10.1038/srep46190>

7. Ghuku S, Saha KN. Large deflection analysis of curved beam problem with varying curvature and moving boundaries. *Engineering Science and Technology an International Journal*. 2018;21(3):408–420. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.04.007>

8. Muñoz S, Ruiz Pico AA, Anton J, Roca D. Comparative Study of Theoretical and Real Deflection of Simple and Reinforced Concrete Joists. *Ingeniería e Investigación*. 2021;41(2):e86742. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n2.86742>

9. Mc Hugh KA, Dowell EN. Nonlinear Response of an Inextensible, Cantilevered Beam Subjected to a Nonconservative Follower Force. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2019;14:DETC2018-85447. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85447>

10. McHugh KA, Dowell EH. Nonlinear Response of an Inextensible, Free-Free Beam Subjected to a Nonconservative Follower Force. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2020;15(2):021003. <https://doi.org/10.1115/1.4045532>

11. Culver D, McHugh K, Dowell E. An assessment and extension of geometrically nonlinear beam theories. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;134:106340. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106340>

12. Falope FO, Lanzoni L, Tarantino AM. Bending device and anticlastic surface measurement of solids under large deformations and displacements. *Mechanics Research Communications*. 2019;97:52–56. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2019.04.011>

13. Minafò G. Local buckling of reinforcing steel bars in RC members under compression forces. *Computers and Concrete*. 2018;22(6):527–538. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.22.6.527>

## Сведения об авторе

**Рзаев Натиг Самандар**, доктор философии в области механики, доцент кафедры инженерной механики, Бакинский инженерный университет, Баку, Азербайджанская Республика; ORCID: 0000-0002-1159-9296; E-mail: nrzayev@beu.edu.az

## About the author

**Natig S. Rzayev**, Ph.D of Philosophy in Mechanics, Associate Professor of the Department of Engineering mechanics, Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan Republic; ORCID: 0000-0002-1159-9296; E-mail: nrzayev@beu.edu.az